

СБОРНИК ТРУДОВ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ

**ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ЗРЕНИЕ  
В СИСТЕМАХ  
УПРАВЛЕНИЯ  
2012**

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
Р.Р. НАЗИРОВА

МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

МОСКВА  
2012

## **Computer Vision in Control Systems 2012. Proceedings of the Scientific-Technical Conference**

**Moscow, 14–16 March, 2012. Ed. R. R. Nazirov**

These are the Proceedings of the third scientific-technical conference “Computer vision in control systems 2012”. The conference was organized by the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, State Research Institute of Aviation Systems, Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences. Experts from the leading organizations both the industrial and academic research institutes as well as industry and universities participate in the conference. The reports, which are presented in the conference, reflect the applications of computer vision in aircraft, terrestrial, floating and underwater robots. Both general problems of computer vision system development and methods of image processing and analysis were considered. The conference was held on March 14–16 in Space Research Institute, Moscow.

## **Техническое зрение в системах управления 2012. Сборник трудов научно-технической конференции**

**Москва, 14–16 марта 2012 г. Под ред. Р. Р. Назирова**

Настоящий сборник содержит материалы 3-й Научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2012». Организаторы конференции — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН)). В проведении конференции участвовали специалисты отраслевых и академических научно-исследовательских институтов, предприятий промышленности, а также высшей школы. На конференции были представлены доклады по применению систем технического зрения летательных аппаратов, наземных, надводных и подводных роботов. Рассматривались общие вопросы разработки систем компьютерного зрения, а также методы обработки и анализа изображений. Конференция проходила 14–16 марта 2012 г. в ИКИ РАН, Москва.

Редакционная коллегия: *Желтов С. Ю., Назиров Р. Р., Визильтер Ю. В., Гришин В. А., Платонов А. К., Соколов С. М., Кропотов А. Н., Носков В. П., Мещеряков А. Ю., Васильев Д. В., Ким Н. В., Алтатов Б. А., Костяшкин Л. Н., Антоненко Е. А.*

Редактор: *Егорова И. Н.*

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Сборник включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», размещаемую на платформе НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ на сайте: <http://www.elibrary.ru>

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей

Электронная версия сборника размещена на сайте ИКИ РАН: <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>

## Содержание

Предисловие .....	6
-------------------	---

### Секция 1

#### СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

<i>Ким Н. В.</i> Использование методов анализа ситуации при решении целевых задач беспилотных летательных аппаратов .....	10
<i>Ошлаков В. Г., Цвык Р. Ш., Илюшин Я. А.</i> Оптическая инструментальная система ориентирования в условиях недостаточной видимости .....	16
<i>Выголов О. В., Визильтер Ю. В., Инсаров В. В., Рубис А. Ю., Каширкин С. В., Реховский А. В.</i> Разработка элементов авиационной системы улучшенного и синтезированного видения .....	26
<i>Дрынкин В. Н., Фальков Э. Я., Царева Т. И.</i> Формирование комбинированного изображения в двухзональной бортовой авиационно-космической системе .....	33
<i>Герман Е. В.</i> Методика оценки безопасности системы улучшенного/синтезированного видения на ранних этапах проектирования .....	40
<i>Блохинов Ю. Б., Веркеенко М. С., Скрябин С. В., Чернявский А. С., Шашов Ю. Ю.</i> Автоматическое определение параметров взаимного разворота космического корабля и орбитальной станции методами компьютерного зрения .....	48
<i>Глазков В. Д., Котцов В. А.</i> Автономный прибор ориентации на Солнце .....	55
<i>Сомов Е. И., Бутырин С. А.</i> Алгоритмы наведения и гиросилового управления ориентацией спутников землеобзора при сканирующей оптико-электронной съемке .....	61

### Секция 2

#### СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НАЗЕМНЫХ, НАДВОДНЫХ И ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

<i>Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б.</i> Система технического стереозрения для измерения координат мобильного робота. ....	72
<i>Алешин В. П., Новгородцев Д. Д., Гришин Е. А., Шаргородский В. Д.</i> Интерактивная система технического зрения для мониторинга состояния космических аппаратов. ....	79

<i>Андреев В. П., Пряничников В. Е.</i>	
Применение сетевых технологий при построении управляемых многокамерных систем технического зрения мобильных роботов . . . . .	88
<i>Бондаренко А. В., Бондаренко М. А., Докучаев И. В.</i>	
Аппаратная реализация бортовой автономной системы улучшенного и синтезированного зрения мобильной техники . . . . .	95
<i>Гришин В. А.</i>	
Референсная архитектура систем управления на основе искусственного интеллекта 4D/RCS (по материалам National Institute of Standards and Technology) . . . . .	103

### Секция 3

### СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

<i>Кий К. И.</i>	
Виртуальные граничные точки и контуры контрастных объектов: новый подход к анализу движения в реальном времени . . . . .	112
<i>Корепанов С. Е., Стротов В. В.</i>	
Комплексный подход к слежению за объектом, размеры которого значительно изменяются со временем . . . . .	118
<i>Кузьмин С. А.</i>	
Способы повышения точности выделения объектов в видеопоследовательностях . . . . .	124
<i>Муравьев В. С., Муравьев С. И.</i>	
Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов для систем видеосопровождения . . . . .	132
<i>Фаворская М. Н., Тупицын И. В.</i>	
Метод повышения устойчивости сопоставлений на стереоизображениях . . . . .	139
<i>Фаворская М. Н., Зотин А. Г., Буряченко В. В.</i>	
Улучшение панорамных снимков на основе стабилизации видеопоследовательностей . . . . .	145
<i>Шальнов Е. В., Кононов В. А., Конушин В. С., Конушин А. С.</i>	
Каскадный алгоритм для отслеживания лица человека в видеопотоке . . . . .	151
<i>Маленичев А. А., Красоткина О. В.</i>	
Разработка системы быстрого распознавания дыма в видеопотоке . . . . .	158
<i>Чигорин А. А., Конев А. А., Кривовязь Г. Р., Велижев А. Б., Конушин А. С.</i>	
Распознавание знаков дорожного движения на изображениях, с обучением на синтетических данных . . . . .	165
<i>Карташев В. А., Ефимов С. С.</i>	
Исследование погрешностей измерения положения объекта стереосистемой с малой базой . . . . .	170
<i>Золотухин Д. А., Сафонов И. В., Крыжановский К. А.</i>	
Реконструкция и фильтрация трехмерной формы микрообъекта по стереопаре изображений с параллельной проекцией . . . . .	174
<i>Корнева Н. Н., Говоров А. В., Назаров В. Н.</i>	
Автоматизированное решение задачи стереоотождествления, повышающее эффективность научных космических исследований . . . . .	180
<i>Себряков Г. Г., Сошников В. Н., Кикин И. С., Ишутин А. А.</i>	
Алгоритм многоканального автосопровождения многоспектральных оптико-электронных изображений наземных объектов на основе пространственных гистограмм распределения их яркости . . . . .	186
<i>Зейналов Р. Ш., Конушин А. С.</i>	
Система бесконтактных измерений параметров движения высокоскоростных объектов . . . . .	193

<i>Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионова И. П.</i> Комплексный анализ изображений, полученных монофотонным УФ-С-датчиком, в задачах дистанционного мониторинга состояния высоковольтных электрических установок. . . . .	199
---	-----

#### Секция 4

### МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

<i>Дорогов А. Ю.</i> Метод параметрической настройки быстрых двумерных ортогональных преобразований на эталонное изображение. . . . .	210
<i>Богданов А. П., Романов Ю. Н.</i> Оценка качества цифровых изображений. . . . .	218
<i>Козлов К. В., Соколов С. М., Соляков В. Н., Тренин Д. Ю.</i> Синтез двухдиапазонных инфракрасных изображений с эквализацией двумерной гистограммы. . . . .	227
<i>Визильтер Ю. В., Сидякин С. В.</i> Морфологические спектры. . . . .	234
<i>Ланге М. М., Новиков Н. А.</i> Представление данных с многоуровневым разрешением для быстрой координатной привязки изображений. . . . .	242
<i>Визильтер Ю. В., Выголов О. В., Рубис А. Ю.</i> Морфологические коэффициенты корреляции форм изображений для задач комплексирования многоспектральной видеоинформации. . . . .	250
<i>Визильтер Ю. В., Сидякин С. В.</i> Бициклические каркасы двумерных фигур. . . . .	258
<i>Корнилов Ф. А., Первалов Д. С.</i> О применении регуляризации морфологического проектора в задаче поиска структурных различий. . . . .	265
<i>Остриков В. Н., Плахотников О. В., Кикоть А. В.</i> Оценка спектрального разрешения аппаратуры гиперспектральной съемки по наблюдениям фраунгоферовых линий. . . . .	272
<i>Остриков В. Н., Плахотников О. В., Кикоть А. В.</i> Сравнительная оценка функции рассеяния точки по результатам тестовой съемки. . . . .	277
<i>Андреев В. П.</i> Коррекция влияния геометрического шума линеек фотодатчиков на видеосигнал в системах технического зрения сканирующего типа. . . . .	283
<i>Дмитриев Н. И., Хрусталева А. А., Ляпин А. И., Суворов Е. Ю.</i> Метод выбора упорядоченного набора фильтров предобработки для систем технического зрения реального времени. . . . .	291

## ПРЕДИСЛОВИЕ

14–16 марта 2012 г. состоялась 3-я Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления-2012». Организаторы конференции — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН). В конференции участвовали специалисты отраслевых и академических научно-исследовательских институтов, предприятий промышленности, а также высшей школы.

Были представлены доклады по применению систем технического зрения (СТЗ) на летательных аппаратах (Секция 1) и в наземных, надводных и подводных роботах (Секция 2). Рассмотрены общие вопросы построения систем компьютерного зрения (Секция 3), методы обработки и анализа изображений (Секция 4).

Анализ тематики докладов показал, что продолжают оставаться актуальными задачи разработки программно-аппаратных средств оценки относительных координат объектов, а также решения навигационных задач для различных типов летательных аппаратов, в частности, при разной точности работы навигационных систем. Сложность подобных задач определяется неоднозначностью условий применения СТЗ и различными критериями оценки их эффективности. Кроме того, решение навигационных задач на малоинформативных участках подстилающей поверхности требует новых подходов к интеллектуализации СТЗ, например, с использованием методов анализа ситуаций.

Повышение требований к современным СТЗ, функционирующим во все более сложных, неопределенных и изменяющихся условиях наблюдения, делает чрезвычайно перспективными исследования в области разработки систем улучшенного и синтезированного видения, работающих, в том числе, с датчиками различной физической природы (телевизионными, инфракрасными, радиолокационными и др.). Они обеспечивают существенное повышение эффективности как в человеко-машинных, так и в автоматических системах управления авиационных и космических аппаратов, наземных, надводных и подводных роботов.

Для мобильных роботов практически важными представляются вопросы разработки программно-аппаратных средств СТЗ оценки координат, прокладки маршрутов и управления. Расширяются исследования в области технологий согласованного управления множеством робототехнических систем. При этом одним из перспективных становится направление создания систем управления на основе автономного искусственного интеллекта.

В рамках исследования систем компьютерного зрения, методов обработки и анализа изображений представлен ряд работ, связанных с выделением (обнаружением) объектов и их автосопровождением. В этих работах для повышения эффективности наблюдений используются граничные точки и контуры объектов, многоспектральные изображения, адаптивные алгоритмы и пр. Разнообразие подходов к решению подобных задач обусловлено различием целей и условий наблюдения.

Практический интерес представляют исследования, связанные с обработкой и анализом стереоизображений, распознаванием объектов различных классов. Следует также отметить актуальность задач оценки и повышения качества изображений программными и аппаратными средствами в сложных условиях наблюдений.

К области фундаментальных (для СТЗ) можно отнести исследования в области разработки методов описания двумерных фигур. Решения этих задач стало одним из важных этапов формирования описаний наблюдаемых сцен и приближает к решению общей проблемы «понимания» ситуаций.

Результаты исследований в представленных докладах соответствуют современному научно-техническому уровню развития и дают представление о тенденциях развития систем технического зрения.

*Н. В. Ким*  
*профессор МАИ, кандидат технических наук, профессор*





**Секция 1**  
**СИСТЕМЫ**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**  
**ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СИТУАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Н. В. Ким**

*Московский авиационный институт  
(Государственный технический университет, МАИ), Москва*

Рассматриваются вопросы использования методов анализа ситуации для решения задач поиска объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Показано, что для оценки уровня понимания может быть использована энтропия.

*Ключевые слова:* анализ ситуации, БЛА, поиск объектов, описание сцены.

В последнее время все большее применение получают автономные беспилотные летательные аппараты (АБЛА), в ряде случаев функционирующие в неопределенной изменяемой обстановке. В этих условиях АБЛА должны самостоятельно принимать решения и планировать свои действия на основе анализа текущей ситуации, в соответствии с поставленной целевой задачей (ЦЗ). Поэтому для них недостаточны возможности существующих систем технического зрения (СТЗ) роботов, которые, в основном, решают задачи поиска, обнаружения и распознавания отдельных объектов интереса [Вильзитер и др., 2010]. Для АБЛА необходимо «понимание» наблюдаемых ситуаций на основе их анализа. Под анализом ситуаций в дальнейшем принимается [Ким, Кузнецов, 2012] формирование описаний объектов и отношений, существенных для выполнения поставленной ЦЗ. Известны работы, посвященные решению проблем ситуационного управления [Поспелов, 1986], однако в области анализа наблюдаемых ситуаций это направление исследований недостаточно развито.

Таким образом, одна из важных задач создания СТЗ АБЛА — развитие методов понимания ситуаций, использование которых позволит повысить эффективность решаемых задач, например, с точки зрения производительности поиска, надежности распознавания и пр.

## ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА НАБЛЮДАЕМЫХ СИТУАЦИЙ

В общем случае, неопределенность (начальная, текущая, конечная) решаемых задач может быть определена энтропией. В частности, для процессов с конечным количеством исходов  $M$  энтропия равна:

$$H = - \sum_{m=1}^M P_m \log_2 P_m ,$$

где  $P_m$  — вероятность  $m$ -го события (исхода) из  $M$  возможных. Энтропия максимальна при равновероятных исходах.

Начальная энтропия, например, присутствия объекта в области поиска  $V$ , с точностью оценки координат  $\Delta V$ , определяется как

---

**Ким Николай Владимирович** — профессор МАИ, кандидат технических наук, профессор, e-mail: NKim2003@list.ru.

$$H_0 = - \sum_{N=1}^N \sum_{m=1}^M P_{nm} \log_2 P_{nm}, \quad (1)$$

где  $N = V/\Delta V$  — количество непересекающихся элементов  $\Delta V$  области поиска,  $n$  — номер, определяющий положение элемента  $\Delta V$ ,  $M = 2$  (исходы присутствия объекта: присутствует — отсутствует).

Отклонение вероятностей (исходов  $M$ ) от равновероятностных значений уменьшает энтропию процесса. Одним из вариантов окончания поиска может быть условие, когда текущая энтропия процесса  $H_i$  становится меньше некоторого заданного порога  $H_i \leq H_f$  (в идеальном случае, когда неопределенность полностью отсутствует,  $H_f = 0$ ).

Анализ ситуаций, улучшающий понимание некоей обстановки в рамках уменьшения области поиска или уточнения вероятностей, позволяет сократить начальную или текущую энтропию процесса. Следовательно, можно считать, что понимание ситуации — это процесс уменьшения энтропии решаемой задачи и, в частности, энтропии поиска объектов.

Предлагаемая технология анализа ситуации реализуется на основе использования:

- баз данных (БД), формируемых заранее и содержащих сведения о возможных объектах (явлениях, процессах) интереса и их атрибутах [Поспелов, 1986], в том числе карт местности;
- баз знаний (БЗ), формируемых заранее и содержащих продукции, описывающие каузальные отношения между объектами (явлениями, процессами) [Ким, Кузнецов, 2012; Поспелов, 1986];
- описаний (моделей).

Последние, в свою очередь, должны включать:

- целевую задачу (ЦЗ);
- состояние СТЗ, включая носитель (принимается, что состояние СТЗ и носителя — штатное, т. е. уникальные атрибуты отсутствуют, поэтому модель состояния не рассматривается);
- обстановку, учитывающую априорную и текущую информацию.

При этом, на основании анализа описаний ЦЗ и текущей обстановки определяются области интереса, а информация, содержащаяся в описании состояния СТЗ, позволяет оценить возможные ограничения на решение ЦЗ.

Пусть, например, ЦЗ — поиск автомобиля марки  $n$  красного цвета. Эта задача должна содержать описание:

- объекта поиска — тип, уникальные атрибуты (движения, наблюдения, дополнительные), возможная целевая функция объекта, возможные местоположение и траектория движения, достоверность;
- области поиска — район (номер, координаты), границы.

Существуют различные варианты описаний. В частности, описание ЦЗ может быть представлено в виде:

$G((SO(I):Type(Car(n)):$  /\*цель — поиск, объект поиска — автомобиль  $n^*$ /\*;

$AtrM(SI(Not) \wedge V(Not)) \wedge P(4)...$  /\*атрибуты движения — дальность, скорость, проходимость и др., отличные от типичных для данной марки автомобиля\*/;

$AtrObs(B(Not) \wedge C(R) \wedge T(Not) \wedge F(Not)) \wedge \dots$	/*атрибуты наблюдения — распределение яркости, цвет, текстура, форма, отличные от типичных*/;
$AtrA(Not) \wedge \dots$	/*дополнительные атрибуты, отличные от типичных*/;
$GSO(Not \wedge P(\cdot)) \wedge Tr(Not \wedge P(\cdot)) \wedge \dots$	/*целевые, поведенческие атрибуты объекта поиска*/.

Здесь «*Not*» обозначает отсутствие или неопределенность соответствующего уникального атрибута.

Описание остальных (типичных) значений атрибутов должны содержаться в БД.

Описание области поиска может основываться на описании границ, географических координатах или, например, в виде:

$SR(724)$	/*в скобках — номер квадрата области поиска*/.
-----------	--

Если имеется векторная карта района поиска, с указанием типов поверхности (лес, дороги и пр.), то данные об атрибутах возможных объектов интереса (априорная составляющая описания) должны содержаться в БД.

Модель текущей обстановки  $MS(\cdot)$  содержит сведения, дополняющие данные, не определенные в БД. Пусть, например, в результате дождей на дорогах образовались водные преграды для транспортных средств. Описание одной из них, обнаруженной СТЗ, может быть представлено в виде

$$MS((O(16) \wedge T(P(4)) \wedge (K(x126 \wedge y109) \wedge M(Jx:7041281 \ Jy:24019394)) \wedge \dots,$$

где  $O$  — объект (тип поверхности);  $T$  — свойства объекта;  $P(4)$  — показатель проходимости;  $K(x, y)$  — координаты центра масс изображения объекта;  $M$  — моменты инерции изображения объекта;  $Sq$  — площадь;  $Jx, Jy$  — значения моментов инерции.

Вид объекта  $O(\cdot)$  задается индексом в скобках. Так, для объектов области поиска: 1 — дорога, 2 — обочина, 3 — луг, 4 — лес, ..., 16 — водная преграда, ... .

База знаний может быть сформирована на основе набора продукций вида [Ким, Кузнецов, 2012; Пospelов, 1986]:

$$(j) S; L; A \Rightarrow B; Q,$$

где  $j$  — номер продукции;  $S$  — класс ситуации;  $L$  — условие актуализации;  $A, B$  — левая и правая части продукции;  $Q$  — указание, вводимое после реализации данной продукции.

Цель использования продукций состоит в определении областей, в которых:

- возможно присутствие объекта поиска;
- невозможно присутствие объекта поиска;
- возможно присутствие объекта поиска, но определенные атрибуты наблюдения могут быть не идентифицируемы;
- возможно присутствие объекта поиска, но он может быть частично или полностью скрыт от наблюдения.

В качестве примера рассмотрим некоторые варианты отношений объекта поиска ( $SO$ ) и объектов интереса, присутствующих в области поиска:

- если некоторая поверхность (объект области поиска) имеет характеристики проходимости ( $O(\cdot)(P(\cdot))$ ), не хуже чем проходимость объекта поиска ( $SO(\cdot)(P(\cdot))$ ), то она проходима  $P$  ( $NP$  — непроходима) и является объектом интереса ( $IO$ ). Описание данного правила имеет вид:

$$\left[ \left[ (2p); SS; L_1(CSR \wedge O(16)); A_1(O(16)(P(4) \geq SO(1)(P(4)) \Rightarrow B_1(P); Q_1(IO)) \right] \vee \dots \right],$$

где  $SS$  — класс задач оценки текущей поверхности;  $CSR$  — распознавание объекта  $O(16)$ ;  $SO$  — объект поиска;  $IO$  — объект интереса;

- если  $SO$  может присутствовать в исследуемой области, но не обнаружен, то требуется анализ ситуаций ( $SA$ ) следующего уровня;
- если существуют объекты, габариты которых больше габаритов  $SO$ , то  $SO$  может быть загорожен.

Одним из сценариев, при реализации которого возможно использование анализа ситуаций, может быть поиск наземного мобильного объекта с предварительным выделением областей интереса (дорог, проходимых искомым объектом участков местности и пр.).

На тестовом примере (рис. 1) представлен фрагмент изображения области поиска при ее обследовании короткофокусной камерой с широким угловым полем зрения.

Область интереса (участок дороги), определенная на основе анализа ситуации, выделена белой линией.

На рис. 2 показан соответствующий фрагмент изображения с увеличенным разрешением, достаточным для реализации обнаружения.

Начальная энтропия поиска мобильного объекта с помощью АБЛА в области площадью  $10 \text{ км}^2$ , в соответствии с (1), равна

$$H_0 = 10^7 \text{ бит.}$$



Рис. 1. Фрагмент изображения области поиска с низким разрешением



**Рис. 2.** Фрагмент области интереса

После проведения автоматического анализа наблюдаемой ситуации энтропия поиска была уменьшена до  $H_0 = 4 \cdot 10^4$  бит.

Таким образом, в ряде случаев анализ ситуации позволяет существенно снизить энтропию наблюдений и, следовательно, сократить объем выполняемых работ.

### **Заключение**

Показано, что уровень понимания решаемой ЦЗ может быть оценен с помощью расчета энтропии процесса.

Предлагаемый подход, основанный на анализе ситуаций, позволяет расширить функциональные возможности автономных роботов, оперативно выделять области интереса наблюдений, рационально распределять поисковые ресурсы.

### **Литература**

- [Вильзитер и др., 2010] *Вильзитер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В.* Обработка и анализ изображений в задачах технического зрения: курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
- [Ким, Кузнецов, 2012] *Ким Н. В., Кузнецов А. Г.* Поиск объектов на основе анализа наблюдаемой ситуации // Техническое зрение в системах управления 2011: Сб. тр. научно-технич. конф. Таруса, 15–17 марта 2011 / Под ред. Р. Р. Назирова. Сер. «Механика, управление, информатика». М.: ИКИ РАН, 2012. С. 209–213.
- [Поспелов, 1986] *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Физматлит, 1986. 288 с.

**USE OF THE SITUATING ANALYSES METHODS AT THE DECISION  
OF OBJECTIVE OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)**

**N. V. Kim**

*Moscow aviation institute (State technical university, MAI), Moscow*

Questions of use of the situation analysis methods for the decision of problems of objects search with use UAV are considered. It is shown that for an estimation of understanding level entropy can be used.

*Keywords:* the situation analysis, UAV, objects search, the scene description.

---

**Kim Nikolay V.** — professor MAI, PhD, professor, e-mail: NKim2003@list.ru.

## ОПТИЧЕСКАЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ВИДИМОСТИ

В. Г. Ошлаков<sup>1</sup>, Р. Ш. Цвык<sup>1</sup>, Я. А. Илюшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИОА СО РАН), Томск

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Изображение луча лазера оказывает влияние на точность лазерной инструментальной системы посадки самолетов. Рассматривается прохождение луча лазера с длиной волны 1,6 мкм в тумане (метеорологическая дальность видимости (МДВ) 300 м). Используя тело яркости, строится изображение луча лазера. В расчете применялось усовершенствованное малоугловое приближение теории переноса излучения. Рассмотрено также влияние турбулентности.

*Ключевые слова:* туман, изображение, лазер, луч, видимость.

Посадка самолетов в тумане при МДВ 300 м на аэродромах, даже оборудованных современными системами посадки MLS (сантиметровый диапазон), рассматривается как критическая. Примеров возникающих при этом аварийных ситуаций множество.

Рассмотрим некоторые вопросы создания лазерной инструментальной системы посадки (ЛИСП) летательных аппаратов (ЛА) [Ошлаков, 2006].

Решением Международной организации гражданской авиации от апреля 1978 г., определены параметры точки касания взлетно-посадочной полосы (ВПП) [Громов, 1986]:

- 1) продольное расстояние от торца ВПП 240...700 м;
- 2) положение по тангажу 0...5°;
- 3) допустимое отклонение от оси ВПП 8,2 м;
- 4) допустимая скорость бокового сноса 2,4 м/с.

Требуемая точность системы координат при заходе на посадку по категориям МКАО — 2,0...8,5 м.

Система посадки должна обеспечивать возможность автоматического приземления любых типов ЛА.

Глиссада от момента захода на посадку до точки касания разбивается на этапы (рис. 1).

Пункты 2 и 4 делают необходимым определение наряду с линейными отклонениями ЛА также и его углового положения относительно глиссады. Современные средства посадки, работающие в радиодиапазоне, не могут это сделать принципиально. В то же время ЛИСП это доступно.

Для успешной посадки ЛА при МДВ 300 м ЛА должен быть подведен средствами посадки к торцу ВПП с минимальными отклонениями от глиссады (линейные и угловые), когда летчик может визуально видеть ВПП с расстояния 15 м.

---

**Ошлаков Виктор Григорьевич** — руководитель подразделения, e-mail: oshlakov@iao.ru.

**Цвык Рэм Шахнович** — руководитель подразделения, кандидат физико-математических наук, e-mail: tsvyk@iao.ru.

**Илюшин Ярослав Александрович** — доцент, кандидат физико-математических наук, e-mail: ilyshin@physics.msu.ru.





Рис. 1. Лазерная система посадки самолета

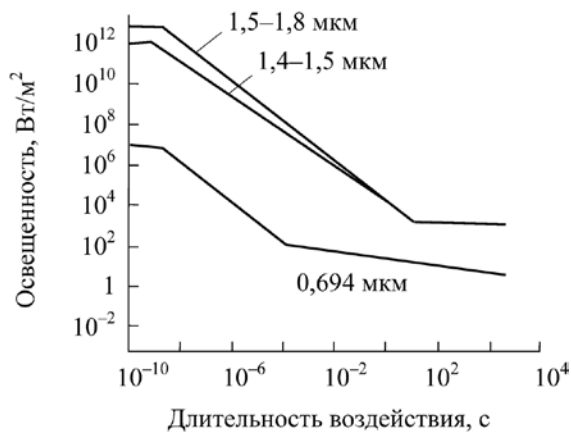


Рис. 2. Максимально допустимое облучение роговицы глаза

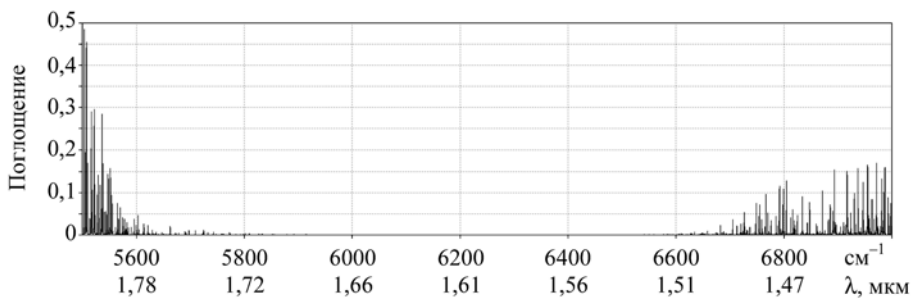


Рис. 3. Поглощение атмосферными газами

В ЛИСП лазер создает излучение высокой направленности (луч), строго ориентированное относительно глассады. Закономерности распространения лазерного излучения в атмосфере определяют три основных фактора — поглощение, рассеяние и турбулентность.

Работа в ближней ИК-области на длине волны 1,6 мкм позволяет принять дополнительные меры для ослабления излучения лазера, попавшего в самолет. При этом ослабления излучения в видимом диапазоне не происходит. Излучение наиболее безопасно для глаз (рис. 2) [Лазерный..., 1979]. Кроме того, оно попадает в окно прозрачности атмосферы (рис. 3) [Справочник..., 1978].

Поглощение и рассеяние аэрозоля (дымка) на длине волны 1,6 мкм равны, и их коэффициент ослабления может достигать  $0,15 \text{ км}^{-1}$ .

В тумане МДВ связана с коэффициентом ослабления  $\alpha$  формулой [Бисярин и др., 1977]:

$$\alpha = \frac{3,9}{\text{МДВ}},$$

и, соответственно, при  $\text{МДВ} = 300 \text{ м}$   $\alpha$  равно  $13 \text{ км}^{-1}$ .

Вследствие рассеяния луч лазера становится видимым, и его можно связать с линией, совпадающей с лучом лазера в виде уравнения

$$\overline{M_0 M} = t \vec{U}_0,$$

где  $\vec{U}_0$  — направляющий вектор линии;  $\overline{M_0 M}$  — любой вектор, лежащий на линии;  $t$  — параметр, любое действительное число.

Зона ориентирования находится вне луча лазера. ЛИСП позволяет определить положение луча лазера в системе координат  $XYZ$ , связанной с ЛА. Например, точкой  $M_0 = (x_0, y_0, z_0)$ , лежащей на луче лазера и направляющим вектором  $\vec{U}_0$ . ЛА по этой информации занимает необходимое положение относительно луча лазера. Чувствительными элементами, размещенными на ЛА, будут две фотоприемные многоэлементные матрицы, определяющие изображение луча лазера. Каждый элемент (пиксел) фотоприемной матрицы и объектив образуют остронаправленный фотоприемник, причем угол поля зрения его  $1^\circ$ , а обзор всей фотоприемной матрицы около  $40^\circ$ .

Как показывают эксперименты и теоретические оценки, для направленно-го пучка при отсутствии поглощения многократное рассеяние мало при  $\tau \delta 5 \dots 6$ . Причем эта граница сдвигается в сторону больших  $\tau$  при увеличении поглощения [Розенберг, 1963], где  $\tau = \alpha L$ , а  $L$  равно расстоянию от лазера до фотоприемника. Следовательно, при малом многократном рассеянии изображение луча может быть построено по законам геометрической оптики.

Для полного описания светового поля в данной точке пространства достаточно знать тело яркости в ней — скалярную функцию яркости в полном телесном угле  $4\pi$  [Шифрин, 1983]. Тело яркости экспериментально измеряется с помощью яркомера (рис. 4) [Иванов, 1969].

Пучок света собирается объективом  $O$ , в фокальной плоскости которого расположен чувствительный элемент (ЧЭ). Площадь объектива и чувствительного элемента  $\sigma_0$  и  $\sigma$  соответственно. На чувствительный элемент попадают все лучи, расположенные в телесном угле  $\omega = \sigma / F^2$ , где  $F$  — фокусное расстояние объектива. Показание измерителя  $\xi = kE$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $E$  — освещенность на чувствительном элементе. Освещенность на объективе

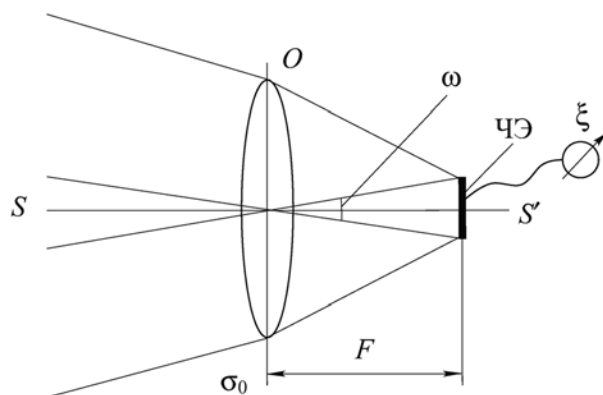


Рис. 4. Схема яркомера

$E_0 = L\omega$ , где  $L$  — яркость светового поля. Отношение площадей объектива и чувствительного элемента  $n = \sigma_0/\sigma$ , поэтому освещенность на чувствительном элементе  $E = nE_0$ . Тогда яркость излучения  $L = F^2\xi/\sigma_0k$ .

Тело яркости в точке определяется при вращении яркомера вокруг этой точки.

Тела яркости в точках, характеризуемых различными  $\tau$  и разным удалением от луча  $R = \alpha l$ , где  $l$  — расстояние от луча, рассчитывалась численным решением уравнения переноса излучения (УПИ) в малоугловом приближении (МУП) методом конечных разностей [Рахтмайер, Мортон, 1972]. В качестве модели тумана использовалась модель облака С1 [Дейрменджан, 1971]. В расчете указанная модель облака была приближенно заменена индикатрисой Хеньи – Гринштейна [Ненуеу, Greenstein, 1941] со значением параметра  $g = 0,94$ , выбранным по наилучшему соответствию модели С1. В основу расчета было положено стационарное скалярное уравнение переноса излучения. Тем самым эффекты, связанные с поляризацией излучения, в расчете не учитывались.

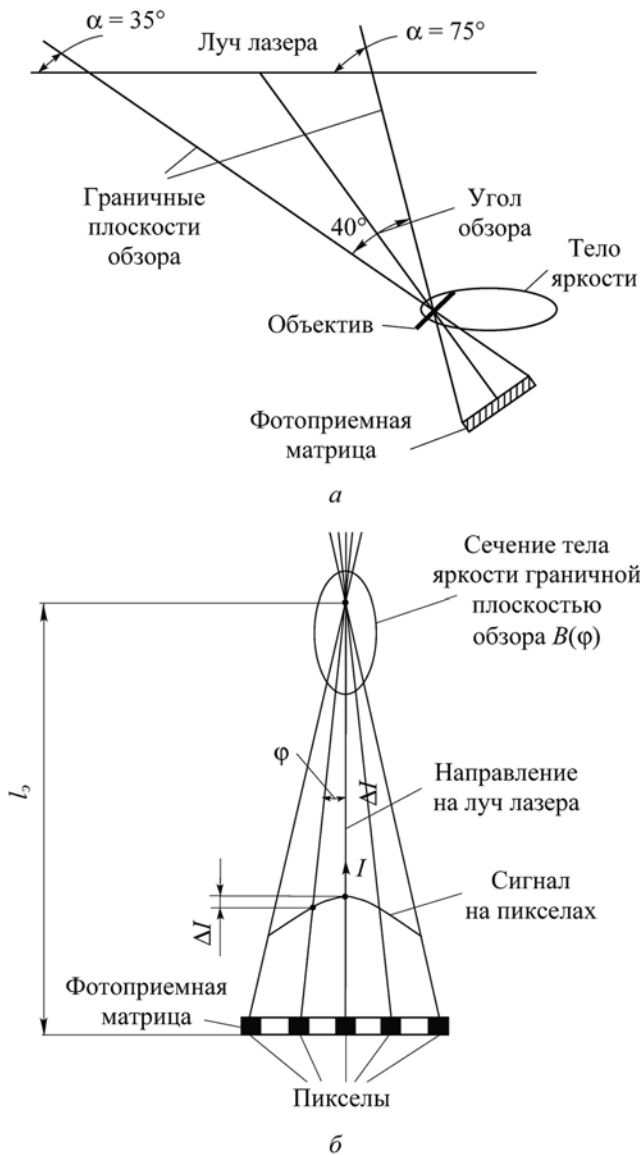
В расчете применялось усовершенствованное малоугловое приближение теории переноса излучения [Pyushin, Budak, 2011; Pyushin, 2012] с учетом дисперсии длин путей распространения излучения. По сравнению с традиционным решением УПИ для узких световых пучков в малоугловом приближении [Arnush, 1972], при таком подходе обеспечивается лучшая точность решения на больших оптических толщинах ( $\tau \gg 1$ ). При необходимости учета диффузного фона излучения, создаваемого источником в среде, т. е. излучения, рассеянного на немалые углы, имеется возможность создания полной численной схемы решения УПИ с выделением нерегулярных компонент поля на основе решения в малоугловом приближении [Pyushin, 2012].

Ширину луча характеризуют сечения тела яркости граничными плоскостями поля обзора (рис. 5, 6). Электронное увеличение изображения эквивалентно увеличению расстояния  $l_3$  между задней главной точкой объектива и фотоприемной матрицей.

Критерий Рэля говорит, что перепад яркости на 20 % достаточен для выделения светящейся точки. Тогда ширина изображения луча по уровню 0,7 определится по формуле:

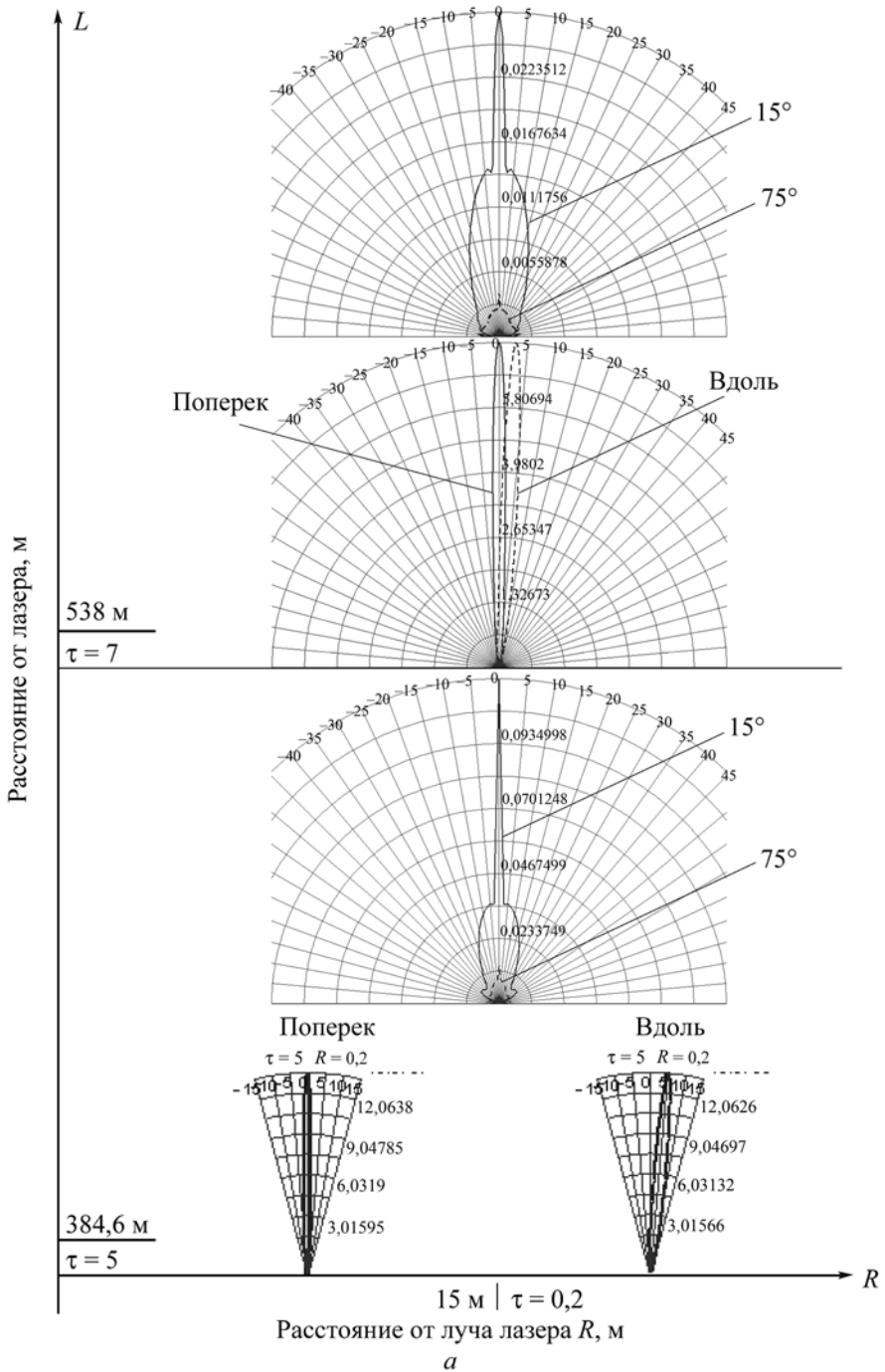
$$\Delta_{0,7} = 2l_3 \operatorname{tg}\varphi_{0,7},$$

где  $\varphi_{0,7}$  — угол сечения тела яркости по уровню 0,7.



**Рис. 5.** Оптимальное расположение фотоприемной матрицы относительно луча лазера (а); сечение тела яркости граничной плоскостью лазера и сигнал на пикселах в этой плоскости (б)

Анализируя сечения тел яркости (рис. 7), можно сделать вывод, что увеличение доли многократного относительно однократного рассеяния наиболее сильно сказывается при  $\tau > 7$ . Это ведет к уширению изображения луча в его сечении этой плоскостью. Тела яркости (рис. 7) определялись для лазера, создающего неполяризованное излучение. Если лазер создает полностью поляризованное излучение, то однократное рассеяние будет оставаться полностью поляризованным, а многократное излучение деполаризуется вследствие случайности актов рассеяния.



**Рис. 6а.** Сечение тел яркости для тумана, соответствующего МДВ = 300 м, плоскостью, перпендикулярной плоскости, проходящей через оси  $L$  (совпадает с лучом лазера) и  $R$  (поперек) и плоскостью, проходящей через оси  $L$  и  $R$  (вдоль), и плоскостями, ограничивающими поле обзора, и образующими с лучом лазера 15° и 75°. Расстояние от лазера  $\tau = 5$ ,  $\tau = 7$

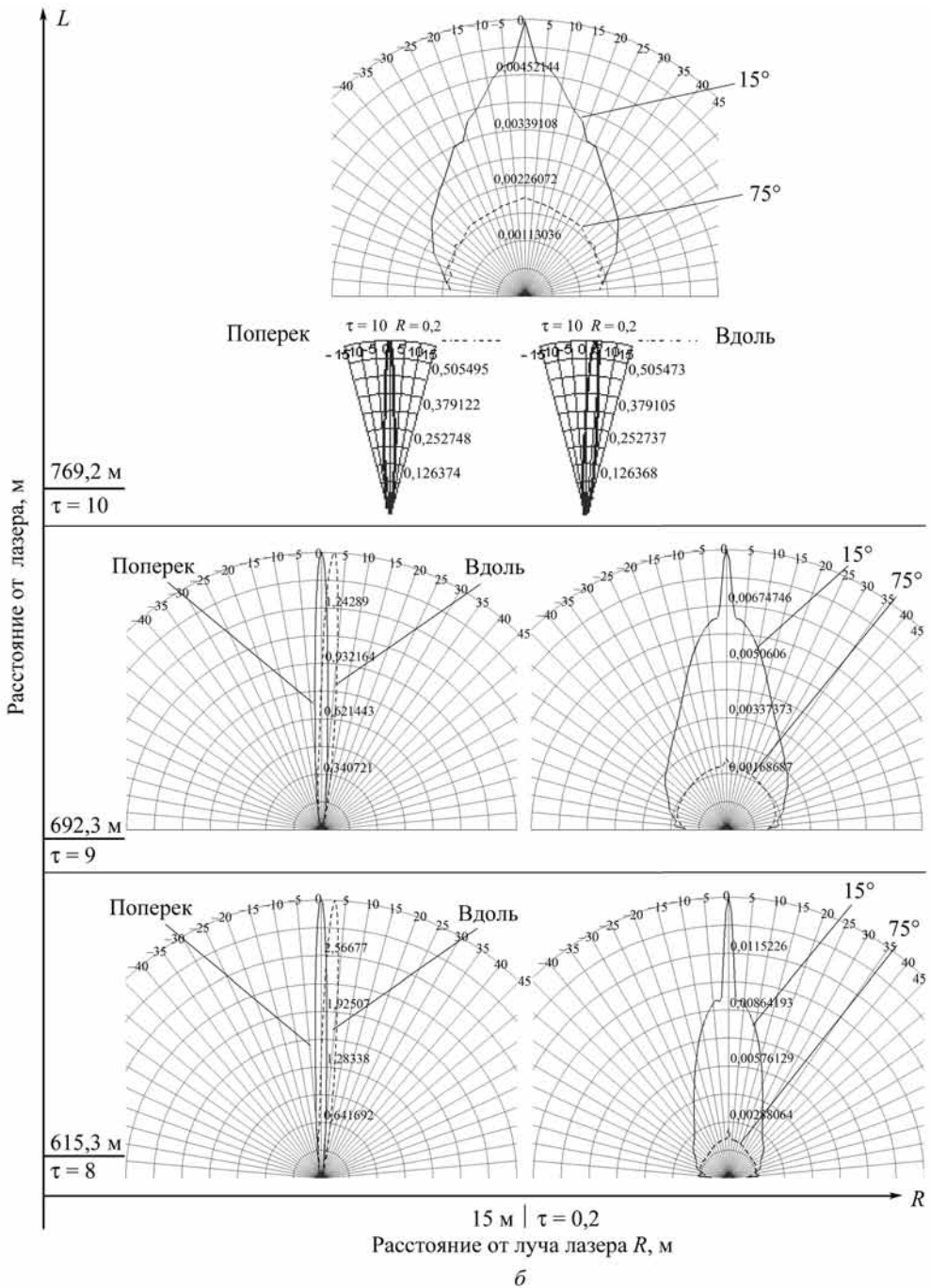


Рис. 6б. Расстояние от лазера  $\tau = 8, \tau = 9, \tau = 10$

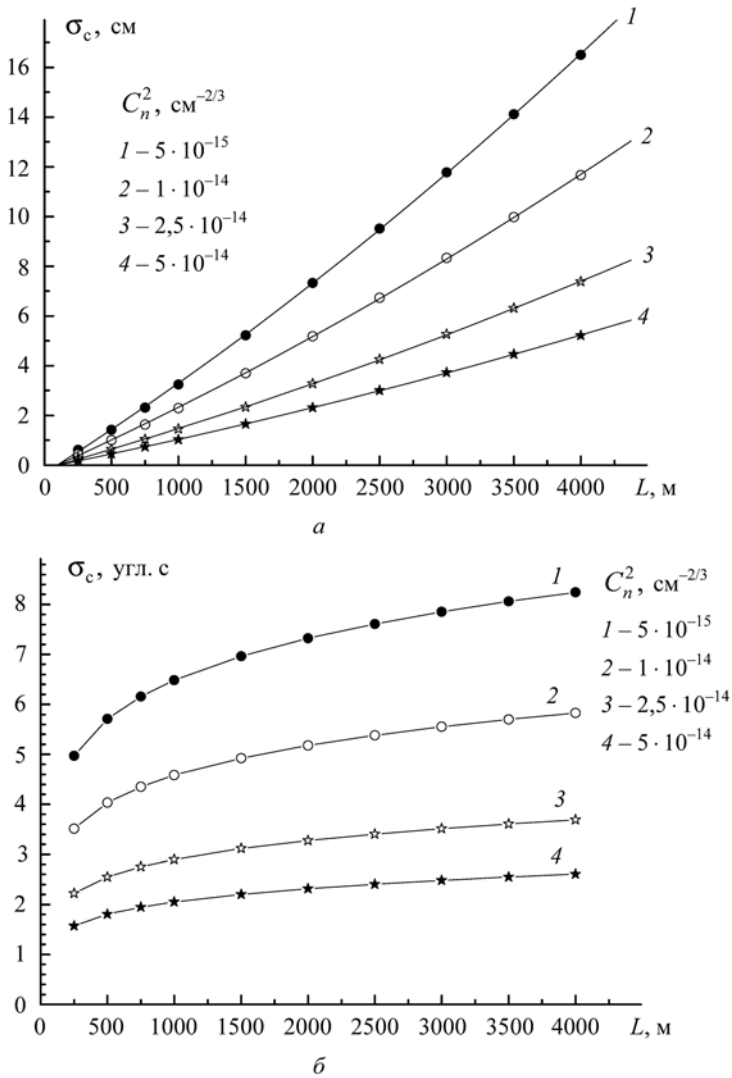


Рис. 7. Расчетная случайная рефракция пучка вдоль трассы при различных уровнях турбулентности: источник — на высоте 2 м над землей, угол наклона трассы —  $3^\circ$

Если поляризация лазера и поляризационные характеристики фотоприемного устройства оптимальны [Ошлаков и др., 2007] для матрицы рассеяния тумана при угле рассеяния  $75^\circ$ , то многократное рассеяние будет отсекается от однократного, и качество изображения луча лазера значительно улучшится и будет оставаться удовлетворительным до  $\tau \cong 9$ .

Из этого можно сделать вывод, что посадку ЛА в тумане при МДВ = 300 м нужно осуществлять комплексом средств. С помощью обычной системы посадки, работающей в радиодиапазоне, ориентировать ЛА до высоты, находящейся между высотой принятия решения I категории и высотой принятия решения II категории, т. е. до расстояния 730,6 м от ВПП. Далее следует осуществлять посадку по более точной ЛИСП.

Результаты расчета случайной рефракции пучка приведены на рис. 7а в сантиметрах, на рис. 7б — в угловых секундах [Зуев и др., 1988].

Проведенное макетирование устройства ориентирования по лучу лазера с целью проверки алгоритма обработки информации с цифровых видеокамер позволяет говорить о высокой потенциальной точности метода. Точка пересечения луча лазера с некоторой плоскостью определялась в цифровом виде с точностью 0,01 м (луч лазера отстоял от видеокамер на расстоянии 1 м), углы направления луча к этой плоскости измерялись с точностью 0,3°.

Авторы благодарят администрацию Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИВЦ МГУ) за предоставленный доступ к вычислительным ресурсам комплекса высокопроизводительных параллельных вычислений СКИФ-ГРИД МГУ «Чебышев».

### ЛИТЕРАТУРА

- [Бисярин и др., 1977] *Бисярин В. П., Соколов А. В., Сухонин Е. В.* и др. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах. М.: Наука, 1977.
- [Громов, 1986] *Громов Г. Н.* Дифференциально-геометрический метод навигации. М.: Радио и связь, 1986.
- [Дейрменджан, 1971] *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971.
- [Зуев и др., 1988] *Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988
- [Иванов, 1969] *Иванов А. П.* Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969.
- [Лазерный..., 1979] Лазерный контроль атмосферы / Под ред. В. Е. Зуева. М.: Мир, 1979.
- [Ошлаков, 2006] *Ошлаков В. Г.* Патент РФ № 2322371. Способ ориентирования движущегося транспорта по световому лучу и устройство ориентации. Приоритет 01.02.2006 г.
- [Ошлаков и др., 2007] *Ошлаков В. Г., Ошлаков В. К., Еремина Т. А.* Оптимальные поляризационные характеристики приборов, регистрирующих рассеянное излучение // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 7.
- [Справочник..., 1978] Справочник по лазерам. Т. 1 / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978.
- [Рахтмайер, Мортон, 1972] *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 418 с.
- [Розенберг, 1963] *Розенберг Г. В.* Сумерки. М.: Физматгиз, 1963.
- [Шифрин, 1983] *Шифрин К. С.* Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
- [Arnush, 1972] *Arnush D.* Underwater light-beam propagation in the small-angle-scattering approximation // J. Optical Soc. of America. 1972. V. 62. P. 1109–1111.
- [Henyey, Greenstein, 1941] *Henyey L. G., Greenstein J. L.* Diffuse radiation in the galaxy // Astrophysical J. 1941. V. 93. P. 70–83.
- [Ilyushin, Budak, 2011] *Ilyushin Ya. A., Budak V. P.* Narrow beams in scattering media: the advanced small-angle approximation // J. Optical Soc. of America. A. 2011. V. 28. P. 1358–1363.
- [Ilyushin, 2012] *Ilyushin Ya. A.* Coherent backscattering enhancement in highly anisotropically scattering media: Numerical solution // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2012. V. 113. N. 5. P. 348–354.



**OPTICAL INSTRUMENTAL ORIENTATION SYSTEM UNDER  
CONDITIONS OF BAD METEOROLOGICAL VISIBILITY**

**V. Oshlakov<sup>1</sup>, R. Tsvyk<sup>1</sup>, Ya. Ilyshin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
(IAO SB RAS), Tomsk*

<sup>2</sup> *Moscow State University (MSU), Moscow*

The laser beam image produces an effect on the accuracy of measurement of the laser instrumental system of aircraft landing. The paper considers the results of laser beam passage at 1.6  $\mu\text{m}$  wavelength in the fog meteorological visibility (MV) is 300 m. Using the brightness body we construct the laser beam image. In the calculation we used the improved small-angle approximation of the radiation transfer theory. The effect of turbulence is also considered.

*Keywords:* fog, image, laser, beam, visibility.

---

**Victor Oshlakov** — head of department, e-mail: oshlakov@iao.ru.

**Ram Tsvyk** — head of department, PhD, e-mail: tsvyk@iao.ru.

**Yaroslav Ilyshin** — associate professor, PhD, e-mail: ilyshin@physics.msu.ru.

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УЛУЧШЕННОГО И СИНТЕЗИРОВАННОГО ВИДЕНИЯ

**О. В. Выголов, Ю. В. Визильтер, В. В. Инсаров, А. Ю. Рубис,  
С. В. Каширкин, А. В. Реховский**

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»  
(ФГУП «ГосНИИАС»), Москва*

Статья посвящена актуальному проекту, направленному на создание научно-технических основ разработки отечественной авиационной системы улучшенного и синтезированного видения, предназначенной для повышения ситуационной информированности экипажа воздушного судна (ВС) с использованием средств технического зрения и компьютерной визуализации. Описаны основные результаты проекта, полученные ФГУП «ГосНИИАС» в кооперации с рядом отечественных предприятий в 2011 г. Приведены основные направления дальнейших работ по проекту.

*Ключевые слова:* авиационные системы улучшенного и синтезированного видения, техническое зрение, виртуальная реальность, интегрированная модульная авионика, комплексирование информации, многоспектральные изображения.

### ВВЕДЕНИЕ

В повышении безопасности и эффективности воздушных перевозок актуальна задача информационной поддержки экипажа ВС в режимах посадки и рулежки по взлетно-посадочной полосе (ВПП) в условиях плохой видимости. На современном этапе развития технологий все более важная роль в решении этой задачи отводится системам технического зрения.

ФГУП «ГосНИИАС» совместно с рядом отечественных предприятий проводит научно-исследовательскую работу (НИР), цель которой — создание научно-технических основ разработки отечественной авиационной системы улучшенного и синтезированного видения (АСУСВ), обеспечивающей средствами технического зрения и компьютерной визуализации формирование и отображение на устройствах индикации обогащенного графического образа закабинной обстановки, на котором визуальные ориентиры различимы летчиком раньше и/или четче, чем невооруженным глазом через остекление кабины.

В работе [Выголов, Визильтер, 2012] был описан ряд основных результатов, полученных в ходе НИР в 2010 г. Данная статья посвящена развитию работы в 2011 г.

---

**Выголов Олег Вячеславович** — начальник лаборатории, кандидат технических наук, e-mail: o.vygolov@gosniias.ru.

**Визильтер Юрий Валентинович** — начальник подразделения, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: viz@gosniias.ru.

**Инсаров Вильям Викторович** — заместитель начальника подразделения, доктор технических наук, профессор, e-mail: wiliam@gosniias.ru.

**Рубис Алексей Юрьевич** — инженер, e-mail: arcelt@mail.ru.

**Каширкин Сергей Викторович** — начальник сектора, e-mail: kash@gosniias.ru.

**Реховский Алексей Валериевич** — начальник сектора.

## **ВЫРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ПО ФУНКЦИЯМ УЛУЧШЕННОГО И СИНТЕЗИРОВАННОГО ВИДЕНИЯ**

На основе анализа требований к характеристикам АСУСВ, содержащихся в [RTCA DO-315..., 2008], сформулированы общие технические требования к функциям улучшенного (СУВ) и синтезированного (ССВ) видения перспективной АСУСВ.

СУВ должна формировать в реальном времени улучшенное изображение за кабиного пространства. Для этого необходимо реализовать функции синхронизированного ввода, улучшения и комплексирования многоспектральной видеоинформации, а также (опционно) формирование изображения высокого разрешения по нескольким изображениям низкого разрешения, стабилизацию дрожания изображения, вызванного вибрациями камеры. СУВ также обеспечивает автоматизацию функций экипажа, таких как обнаружение ВПП и типовых элементов инфраструктуры аэродрома на этапах взлета и посадки, обнаружение препятствий на ВПП на этапах посадки и рулежки.

Задача ССВ — синтезирование в бортовом вычислителе изображения топографического участка, соответствующего фактической внешней обстановке, видимой пилотом через остекление кабины, и векторные графические образы полета. Изображение должно представлять собой трехмерный вид за кабиного пространства с глубиной обзора достаточной для восприятия экипажем относительного расстояния до топографических объектов.

В задачу ССВ также входит автоматическое распознавание и формирование символики представления потенциально опасных ситуаций, включая столкновение с землей и препятствиями — объектами инфраструктуры, выкатывание за границы ВПП.

К общим требованиям к АСУСВ можно отнести:

- наличие функций усиления контраста изображения, электронного изменения масштаба изображения, автоматического поворота изображения, стоп-кадра;
- выполнение синтеза «обогащенного» изображения, сочетающего улучшенное изображение с пилотажно-навигационной информацией, представленной в виде текста и векторных графических образов полета, и элементами трехмерной компьютерной визуализации, формируемыми ССВ. (при этом растровая, векторная и текстовая информация должны быть совмещены по направлению и масштабу с фактическим видом через остекление кабины);
- обеспечение вывода улучшенного изображения на индикатор на лобовом стекле (ИЛС) и (опционно) на многофункциональный индикатор (МФИ).

В части взаимодействия с другими бортовыми системами АСУСВ не должна ухудшать общее качество представления полетной информации на индикаторе. Отказ в работе АСУСВ не должен приводить к отказу сопряженного оборудования.

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ВНЕШНИХ ДАННЫХ**

Для отработки алгоритмического и программного обеспечения АСУСВ средствами математического моделирования была разработана система имитации внешних данных (ИВД). Она воспроизводит район действий ВС с учетом метеословий, времени суток, состояния атмосферы, фона неба, спецэффектов.



**Рис. 1.** Примеры изображений, синтезируемых ИВД: *а* — ТВ-диапазон; *б* — ИК-диапазон 3...5 мкм; *в* — проволочная модель сцены *а*

В основе ИВД представление внешней обстановки в виде трехмерной модели местности и инфраструктуры, динамических моделей воздушных объектов и динамических моделей наземных/надводных объектов.

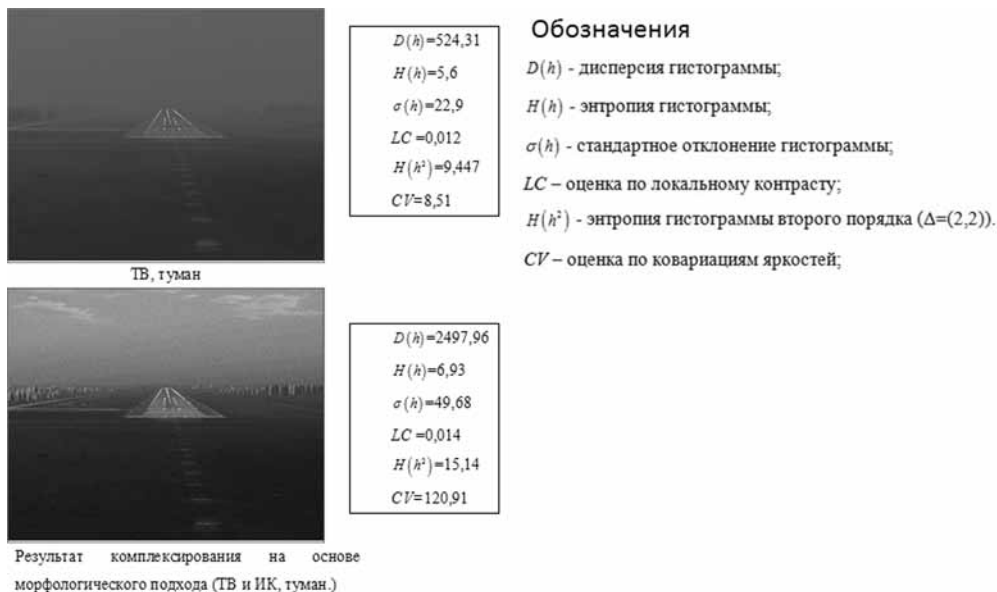
При помощи ИВД был получен значительный объем реалистичных модельных данных, которые включают образы ВПП в ТВ и ИК 3...5 мкм диапазонах при различных способах захода на посадку в широком спектре суточных и погодных условий, видеопоследовательности, имитирующие «дрожание» видеодатчика, вызванное вибрациями борта ВС, а также изображения проволочных моделей объектов. Примеры изображений, синтезируемых ИВД, приведены на рис. 1.

## ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВПП

В качестве численных оценок информативности цифровых изображений, полученных в спектральных диапазонах ТВ и ИК (8...14 и 3...5 мкм), использовался ряд критериев, основанных на объективной оценке как статистических, так и качественных показателей изображения. В том числе были получены относительные численные оценки информативности результатов комплексирования с учетом анализа изображений ТВ- и ИК-диапазонов.

Критерии абсолютной оценки информативности основывались на оценке характеристик гистограммы изображения (дисперсия, энтропия информации), матрицы смежности (энтропия информации), показателей локального контраста. Для относительной оценки информативности использовались относительная энтропия гистограмм, взаимная информация гистограмм, метрика Пьелла [Piella, Heijmans, 2003], метрика Ксидис – Петрович [Xydeas, Petrovic, 2000].

Примеры расчета показателей информативности по перечисленным критериям приведены на рис. 2, 3.



**Рис. 2.** Пример численных оценок информативности для модельного ТВ-изображения и результата комплексирования ТВ и ИК-изображений



**Рис. 3.** Пример численных оценок информативности для двух результатов комплексирования ТВ- и ИК-изображений — на основе морфологического подхода и на основе взвешенного суммирования

Исследования свойств реалистичных модельных видеорегистраций ТВ- и ИК-диапазонов показали, что реализованные критерии объективных мер информативности изображений показывают устойчивые результаты, совпадающие с субъективными визуальными оценками изображений экспертами.

### РАЗРАБОТКА СТЕНДОВОГО ПРОТОТИПА АСУСВ

Разработан стендовый прототип АСУСВ, функционирующий на базе платформы интегрированной модульной авионики (ИМА) и включающий в себя:

- макет кабины с органами управления;
- систему моделирования полета ВС;
- систему ИВД, обеспечивающую визуализацию закабинного пространства для его восприятия летчиком-оператором, а также имитацию выходов видеодатчиков ТВ и ИК-диапазонов;
- крейт ИМА, на четырех синхронизированных модулях которого выполняются вычислительные задачи — три модуля отвечают за выполнение задач СУВ, четвертый выполняет задачу ССВ и обеспечивает межмодульное и общесистемное взаимодействие.

На стендовом прототипе АСУСВ отработаны следующие функции улучшенного и синтезированного видения:

- улучшение качества ТВ- и ИК-изображений на основе алгоритма Retinex [Land, McCann, 1971];

- комплексирование ТВ- и ИК-видеоинформации на основе морфологического подхода [Пытьев, Чуличков, 2010];
- обнаружение ВПП на видеоизображениях;
- наложение цифро-шкальной пилотажной информации и элементов графики определения ВПП на улучшенное изображение;
- вывод синтезированного изображения, полученного на основе бортовой базы данных сетки высот и пилотажно-навигационной информации, передаваемой в платформу ИМА от системы моделирования полета ВС.

Результаты тестирования функций улучшенного и синтезированного видения на стендовом прототипе АСУСВ показали их принципиальную реализуемость на вычислительной платформе ИМА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2012 г. основными направлениями в рамках создания прототипа отечественной АСУСВ стали:

- разработка и совершенствование алгоритмов интеллектуальной видеообработки, в частности: алгоритма обнаружения ВПП с учетом текущей пилотажно-навигационной информации и использованием трехмерной модели местности и объектового состава, алгоритмических и программных средств для автоматического обнаружения типовых препятствий на ВПП, методики, алгоритмических и программных средств для привязки и совмещения синтезированной и наблюдаемой видеоинформации, сравнительного тестирования и комплексирования алгоритмов интеллектуальной видеообработки;
- создание, отработка и испытания летного прототипа на базе крейта ИМА, демонстрирующего функции СУВ;
- получение летных экспериментальных данных;
- получение реалистичных модельных видеорегистраций ТВ и ИК диапазонов с использованием стенда математического и полунатурного моделирования закабинной обстановки;
- проработка возможности использования отечественных видеодатчиков в составе разрабатываемой АСУСВ;
- проработка возможностей сертификации создаваемой системы АСУСВ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-08-01114-а, 11-08-01039-а).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Выголов, Визильтер, 2012] *Выголов О. В., Визильтер Ю. В.* Разработка элементов авиационной системы улучшенного видения // Техническое зрение в системах управления-2011: Сб. тр. научно-технич. конф. Москва, ИКИ РАН, 15–17 марта 2011. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 47–50.
- [Пытьев, Чуличков, 2010] *Пытьев Ю. П., Чуличков А. И.* Методы морфологического анализа изображений. М.: Физматлит, 2010. 336 с.
- [Land, McCann, 1971] *Land E. H., McCann J. J.* Lightness and Retinex theory // J. Optical Soc. of America. 1971. V. 61. P. 1–11.

- [Piella, Heijmans, 2003] *Piella G., Heijmans H.* A new quality metric for image fusion // Proc. Intern. Conf. Image Process (ICIP). 2003. V. 3. P. 173–176.
- [RTCA DO-315..., 2008] RTCA DO-315 “Minimum Aviation System Performance Standard (MASPS) for Enhanced Vision Systems, Synthetic Vision Systems, Combine Vision Systems and Enhanced Flight Vision Systems”. RTCA, Inc, 2008.
- [Хыдеас, Петрович, 2000] *Хыдеас С. С., Петрович В.* Objective image fusion performance measur // Electronics Letters. 2000. V. 36. N. 4. P. 308–309.

## DEVELOPMENT OF AN ENHANCED AND SYNTHETIC VISION SYSTEM FOR AVIATION

**O. V. Vygolov, Yu. V. Vizilter, W. V. Insarov, A. Yu. Rubis,  
S. V. Kashirkin, A. V. Rehovskij**

*FGUP “State Research Institute of Aviation Systems” (FGUP “GosNIIAS”), Moscow*

The paper describes the actual project aimed at creating scientific and technological bases for development of national aviation combined vision system, which designed to improve situational awareness of an aircraft crew with the use of computer vision and virtual reality. The main results obtained by FGUP «GosNIIAS» in cooperation with several domestic enterprises in 2011 are represented. In conclusion the basic directions for further work are formulated.

*Keywords:* combined vision system for aviation, technical vision, virtual reality, integrated modular avionics, data fusion, multispectral images.

---

**Vygolov Oleg V.** — head of laboratory, PhD, e-mail: o.vygolov@gosniias.ru.

**Vizilter Yuriy V.** — head of department, dr. sci. (phys.-math.), prof., e-mail: viz@gosniias.ru.

**Insarov William V.** — deputy head of department, dr. sci. (tech.), prof., e-mail: wiliam@gosniias.ru.

**Rubis Aleksey Yu.** — engineer, e-mail: arcelt@mail.ru.

**Kashirkin Sergey V.** — head of group, e-mail: kash@gosniias.ru.

**Rehovskij Aleksey V.** — head of group.



## ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ДВУХЗОНАЛЬНОЙ БОРТОВОЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

**В. Н. Дрынкин, Э. Я. Фальков, Т. И. Царева**

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
«ГосНИИ Авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), Москва*

Предлагается метод формирования комбинированного многозонального изображения на основе теории оптимальной дискретизации многомерных сообщений. Приведена структура трехмерного интерполирующего фильтра нижних частот, осуществляющего формирование комбинированного двухзонального телевизионно-тепловизионного (ТВ-ТпВ) изображения. Представлены результаты полунатурного моделирования комбинированных ТВ-ТпВ изображений.

*Ключевые слова:* комбинированное многозональное изображение, оптимальная дискретизация, интерполирующий фильтр нижних частот.

### ВВЕДЕНИЕ

Постоянно увеличивающийся объем решаемых авиацией задач, повышение требований к безопасности полетов, при заходе на посадку и приземлении требуют непрерывного совершенствования бортового электронного оборудования, позволяющего решать эти задачи в реальном времени и осуществлять комплексирование подсистем навигации, поиска и обнаружения объектов в единую систему на базе централизованного использования цифровой вычислительной техники и систем индикации.

В 70-х годах прошлого столетия возникло новое направление в развитии авиационно-космических систем (АКС) — построение мультипроцессорных многофункциональных систем с многоканальными подсистемами передачи информации. Особое место отводится созданию многоспектральных оптико-электронных (в том числе телевизионных (ТВ) и тепловизионных инфракрасных (ТпВ ИК)) систем, обеспечивающих поиск и обнаружение наземных объектов независимо от метео- и временных условий [Бровкина и др., 2007; Визильтер, Желтов, 2011; Gordon, 2005].

Большинство ТпВ-систем по четкости изображения уступают ТВ-системам, а применяемые способы индикации часто требуют сложной интерпретации ИК-изображений. В то же время комбинированное использование ТпВ- и ТВ-систем и совместное воспроизведение изображений на одном экране позволяют существенно расширить возможности АКС и повысить информативность изображения для восприятия его человеком-оператором [Визильтер, Желтов, 2011; [Костяшкин и др., 2011].

---

**Дрынкин Владимир Николаевич** — начальник сектора, e-mail: drynkin@gosniias.ru.

**Фальков Эдуард Яковлевич** — начальник отделения, кандидат технических наук, e-mail: falkov@gosniias.ru.

**Царева Татьяна Игоревна** — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, e-mail: tsareva@gosniias.ru.

Многозональная информация считается трехмерной: две пространственные координаты и одна спектральная. Учет более полного числа координат многомерного пространства — основа совершенствования систем обработки изображений [Бородянский, 1985]. Переход к многомерным методам обработки, обладающим значительно большим числом степеней свободы, придает системам гибкость, не свойственную одномерным системам [Даджион, Мерсеро, 1988].

В работе рассматривается метод формирования комбинированного телевизионно-тепловизионного изображения на основе многомерной цифровой фильтрации.

### СИНТЕЗ ТРЕХМЕРНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ ДЛЯ ТВ-ТПВ ДВУХЗОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Очевидная необходимость совместного применения различных средств наблюдения побуждает рассматривать их не как самостоятельно функционирующие модули, а как единую комбинированную обзорную бортовую систему, обеспечивающую синергизм процесса обнаружения и опознавания за счет использования дополнительных отличительных признаков сцены. Такая двух- (трех-)канальная система, имеющая единую подсистему индикации, должна обеспечивать, наряду с получением информации по отдельным каналам, возможность ее комплексирования.

Многозональная система осуществляет дискретизацию воздействующего излучения сцены по элементам пространства  $x\{x_1, x_2, \dots, x_3\}$ ,  $y\{y_1, y_2, \dots, y_3\}$ , и длинам волн спектра излучения  $\lambda\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_3\}$ . Формируемое в этом случае изображение можно рассматривать как трехмерную функцию  $I(x, y, \lambda)$ . Представление многозональных изображений в дискретной форме позволяет обрабатывать их как числовые массивы и сводит задачу синтеза комбинированного изображения к многомерной цифровой фильтрации.

Дальнейшее рассмотрение проведем на примере двухзональной АКС. Формирование комбинированного изображения по его отсчетам, взятым из разных спектральных каналов, осуществим на основе теории оптимальной дискретизации и восстановления многомерных сообщений. Задача формирования изображения по его отсчетам в этом случае сводится к синтезу многомерного интерполирующего фильтра нижних частот (ФНЧ), область пропускания которого согласована с областью существования спектра изображения [Бородянский, Дрынкин, 1987].

Ниже приводятся результаты разработки трехмерного интерполирующего ФНЧ первого порядка, обеспечивающего формирование комбинированного двухзонального изображения объекта. Фильтр синтезирован методом многомерной рекурсивно-нерекурсивной фильтрации [Бородянский, Дрынкин, 1986; Drynkin, 1995], обеспечивающим согласование характеристик ФНЧ со спектрами реальных изображений.

С учетом присущей реальным изображениям анизотропии их спектров, область пропускания  $D_0$  пространственно-частотной характеристики трехмерного интерполирующего ФНЧ определим в виде октаэдра

$$D_0 : |v_x| + |v_y| + |v_\lambda| = a, \quad (1)$$

где  $a \leq 1$ ;  $v_x, v_y, v_\lambda$  — соответствующие нормированные продольные, поперечные и спектральные частоты.

Область пропускания  $D_0$  представляет собой аппроксимацию изоэнергетической поверхности, которая оптимальным образом ограничивает область существования воспроизводимых пространственных и спектральных частот двухзонального изображения.

С учетом практической реализации примем  $a = 0,8$  и согласно методу синтеза рекурсивно-нерекурсивных комбинированных структур получим трехмерный интерполирующий ФНЧ с комплексной пространственно-частотной характеристикой (ПЧХ) в виде

$$\dot{K}(v_x, v_y, v_\lambda) = \frac{0,5(1 + e^{-j\pi v_\lambda})}{1 - \beta(v_x, v_y) e^{-j\pi v_\lambda}} [1 - \beta(v_x, v_y)] K_2(v_x, v_y), \quad (2)$$

где

$$\beta(v_x, v_y) = 0,531 - 2 \times 0,156(\cos \pi v_x + \cos \pi v_y) - 4 \times 0,109 \cos \pi v_x \cos \pi v_y; \quad (3)$$

$$K_2(v_x, v_y) = 0,625 + 0,25(\cos \pi v_x + \cos \pi v_y) - 0,125 \cos \pi v_x \cos \pi v_y. \quad (4)$$

Двумерная ПЧХ нерекурсивной цепи обратной связи  $\beta(v_x, v_y)$  (3) получена с учетом обеспечения устойчивости результирующего трехмерного ФНЧ и полностью определяет заданную конфигурацию области пропускания  $D_0$  синтезируемого фильтра в направлении спектральных частот  $v_\lambda$ .

Двумерная ПЧХ  $K_2(v_x, v_y)$  (4) нерекурсивной цепи коррекции с линейной фазовой характеристикой обеспечивает формирование области пропускания  $D_0$  в направлении поперечных частот  $v_y$ . Эта цепь синтезирована с учетом обеспечения наиболее равномерной в области пропускания характеристики фильтра и, в то же время, нежелательностью потерь разрешающей способности системы в продольном и поперечном направлениях. Кроме того, это звено обеспечивает нулевой коэффициент передачи в частотных областях  $(|v_x|, |v_y|, |v_\lambda|) = (1, 1, 0)$ , где нежелательные продукты дискретизации и высокочастотные помехи могут иметь наибольшую интенсивность.

Обобщенная структурная схема фильтра для случая ТВ-ТпВ АКС, в которой ТВ изображение имеет более высокое по сравнению с ТпВ-изображением разрешение, показана на рис. 1.  $\dot{S}_{ТпВ}(v_x, v_y)$  и  $\dot{S}_{ТВ}(v_x, v_y)$  — двумерные комплексные спектры соответственно ТпВ- и ТВ-изображений.

Синтезированный фильтр имеет ряд существенных в данном приложении особенностей.

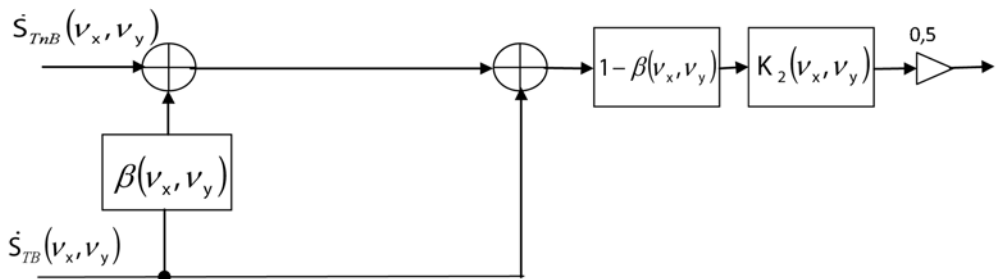


Рис. 1. Структурная схема трехмерного интерполирующего ФНЧ первого порядка для двухзональной ТВ-ТпВ-системы

Во-первых, низкая чувствительность полученной структуры фильтра к квантованию коэффициентов его передаточной функции позволяет заменить трудоемкие операции цифрового умножения поразрядным сдвигом со сложением. Это дает возможность осуществить эффективную обработку информации в реальном времени.

Во-вторых, пространственно-частотные характеристики синтезированного фильтра согласованы со спектрами реальных изображений, что обеспечивает необходимое качество интерполяции при формировании комбинированного изображения.

В-третьих, полученная при синтезе рекурсивно-нерекурсивная структура фильтра требует при реализации сравнительно небольших аппаратных затрат, что приводит к уменьшению массогабаритных и энергетических показателей устройства.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2–4 представлены результаты полунатурного моделирования комбинированных изображений в двухзональной АКС с использованием реальных ТпВ- и ТВ-изображений. Моделирование осуществлялось методами фильтрации в частотной области. Реальные изображения заменялись их комплексными фурье-спектрами, которые обрабатывались с помощью ПЧХ (2) трехмерного ФНЧ согласно структурной схеме, изображенной на рис. 1.

Для сравнения комбинированные ТпВ-ТВ-изображения были получены тремя способами: с помощью предложенного трехмерного ФНЧ, методом усреднения ТпВ и ТВ-изображений и с приоритетом ТВ. По характеру яркостного и цветового распределения все комбинированные изображения похожи на их ТВ-прототипы, но тепловой контраст сцены воспроизводится по-разному. Расчет теплового контраста сцены  $K$  производился по формуле

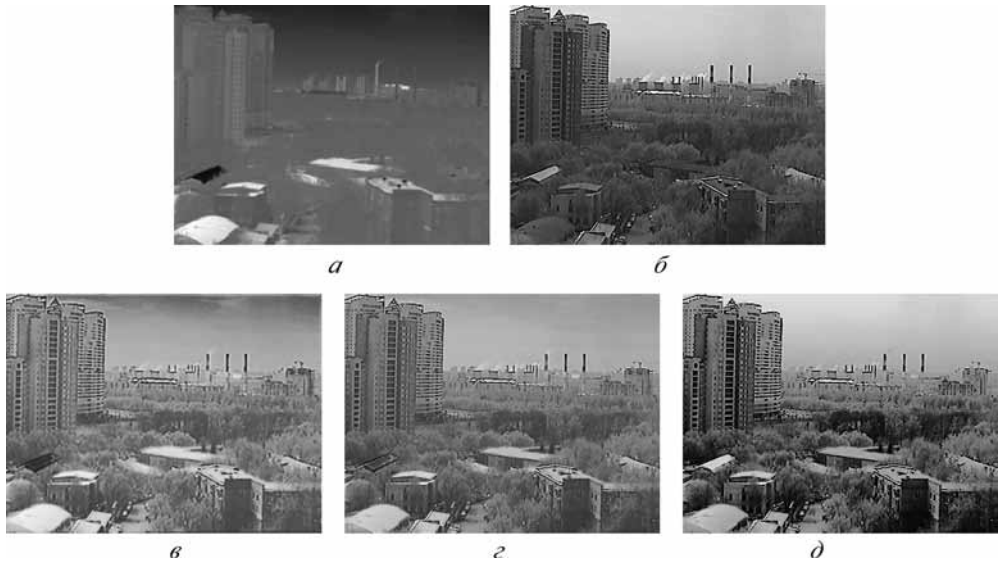
$$K = \frac{k_h - k_c}{k_h + k_c}, \quad (5)$$

где  $k_h$  — «тепловая» яркость самой теплой части сцены;  $k_c$  — «тепловая» яркость самой холодной части сцены.

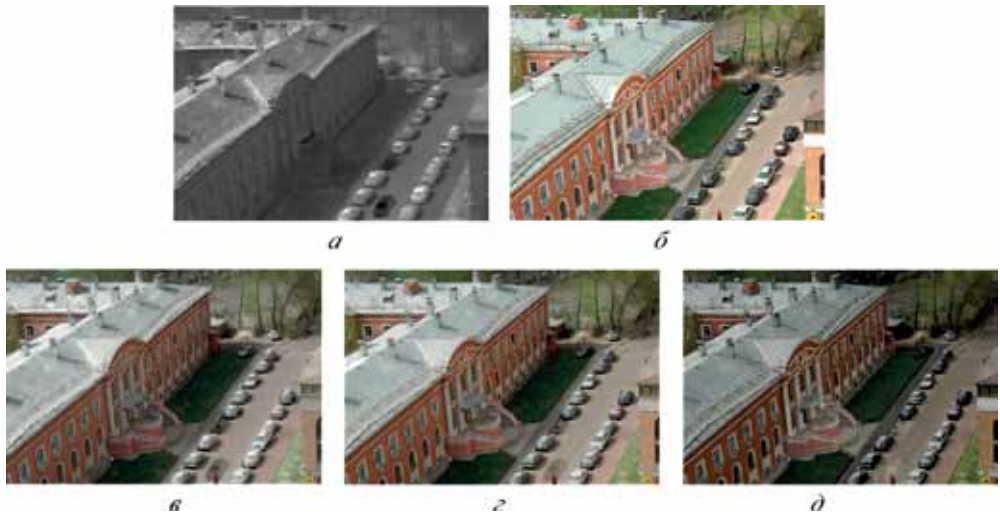
Из рис. 2–4 и приведенной ниже таблицы видно, что синтезированные с помощью разработанного трехмерного ФНЧ-изображения более точно передают тепловой контраст сцены по сравнению с другими вариантами. Так, на результирующем изображении сцены 2 (рис. 4в) хорошо просматривается «холодный след» автомобиля, недавно покинувшего место парковки. Это явление можно использовать, например, в охранных системах.

#### Тепловые контрасты сцен

Сцена	Тепловой контраст на изображениях ( $K$ )			
	ТпВ	Комбинированные изображения		
		с помощью трехмерного ФНЧ	методом усреднения	с приоритетом ТВ
Сцена 1	0,83	0,53	0,38	-0,09
Сцена 2	0,50	0,31	0,2	0,15



**Рис. 2.** Изображения сцены 1: *а* — исходное ТПВ; *б* — исходное ТВ; *в* — комбинированное с помощью трехмерного ФНЧ; *г* — комбинированное методом усреднения; *д* — комбинированное с приоритетом ТВ

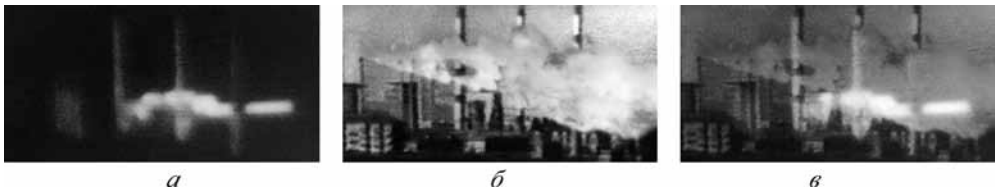


**Рис. 3.** Изображения сцены 2: *а* — исходное ТПВ; *б* — исходное ТВ; *в* — комбинированное с помощью трехмерного ФНЧ; *г* — комбинированное методом усреднения; *д* — комбинированное с приоритетом ТВ

В дополнение следует отметить, что в отличие от телевизионных изображений результирующее комбинированное изображение менее подвержено воздействию помех, прозрачных в ИК-диапазоне. На рис. 5б представлен вариант телевизионного изображения теплоэлектроцентрали, содержащего помеху, затрудняющую опознавание объекта. Комплексирующие этого изображения с ИК-образом объекта существенно уменьшает маскирующие свойства помехи (рис. 5в).



**Рис. 4.** Фрагмент сцены 2: *а* — исходное ТпВ; *б* — исходное ТВ; *в* — комбинированное с помощью трехмерного ФНЧ; *г* — комбинированное методом усреднения; *д* — комбинированное с приоритетом ТВ



**Рис. 5.** Ослабление помехи в комбинированном изображении

Полученные результаты предварительные и требуют дальнейшего исследования, однако, можно с уверенностью сказать, что предложенный подход может служить основой совершенствования бортовых авиационно-космических систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [Бородянский, 1985] *Бородянский А. А.* Гипертреугольная дискретизация  $n$ -мерных сообщений // Радиотехника. 1985. № 4. С. 49–52.
- [Бородянский, Дрынкин, 1986] *Бородянский А. А., Дрынкин В. Н.* Синтез многомерных рекурсивно-нерекурсивных фильтров // Радиотехника. 1986. № 4. С. 47–51.
- [Бородянский, Дрынкин, 1987] *Бородянский А. А., Дрынкин В. Н.* Вертикально-временная фильтрация в системах телевидения повышенной четкости. М., 1987. 15 с. Деп. в ЦНТИ «Информсвязь». № 1068-св.
- [Бровкина и др., 2007] *Бровкина О. В., Григорьева О. В., Груздев В. Н., Захаров С. В., Пономарев С. А., Чапурский Л. И., Чиков К. Н.* Аппаратура, методики и результаты использования материалов видеоспектральной и тепловой аэросъемки для экологического мониторинга территорий и акваторий // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 1. С. 209–215.
- [Визильтер, Желтов, 2011] *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.* Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Технич. зрение в системах управления

- мобильными объектами-2010: Тр. научно-технич. конф.-семинара. Вып. 4. / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 11–44.
- [Даджион, Мерсеро, 1988] *Даджион Д., Мерсеро Р.* Цифровая обработка многомерных сигналов / Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 488 с.
- [Костяшкин и др., 2011] *Костяшкин Л. Н., Бабаев С. И., Логинов А. А., Павлов О. В.* Технологии систем улучшенного/синтезированного зрения для управления летательными аппаратами // Технич. зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Тр. научно-технич. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 45–56.
- [Drynkin, 1995] *Drynkin V. N.* Real-Time design of N-dimensional digital filters for image processing // Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95 / Ed. E. A. Fedosov. St. Petersburg, 1995. P. 240–249.
- [Gordon, 2005] *Gordon D. P.* Using orthorectification for cross-platform image fusion // Anais 12 Simposio de Sensoriamento Remoto, Goiania. Brasil, 16–21 abril 2005. INPE. 2005. P. 4081–4088.

## COMPOSITE IMAGE GENERATION IN TWO-SPECTRAL ONBOARD AIRSPACE SYSTEM

V. N. Drynkin, E. J. Falkov, T. I. Tsareva

*State research institute of aviation systems (FGUP "GosNIAS"), Moscow*

Composite multispectral image generation method based on the optimal digitization theory of multidimensional signal is proposed. The architecture of 3D low-pass filter for composite two-spectral (TV-IR) image generation is considered. The results of composite TV-IR image semi-realistic simulation are presented.

*Keywords:* composite multispectral image, optimal digitization, interpolation low-pass filter.

---

**Drynkin Vladimir Nikolaevich** — head of sector, e-mail: drynkinv@gosnias.ru.

**Falkov Edward Jakovlevich** — head of department, candidate of science, e-mail: falkov@gosnias.ru.

**Tsareva Tatiana Igorevna** — senior researcher, candidate of science, e-mail: tsareva@gosnias.ru.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ УЛУЧШЕННОГО/СИНТЕЗИРОВАННОГО ВИДЕНИЯ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Е. В. Герман**

*Открытое акционерное общество «Государственный рязанский  
приборный завод» (ОАО «ГРПЗ»)*

Рассматриваются вопросы обеспечения контроля уровня безопасности системы улучшенного/синтезированного видения на ранних этапах проектирования. Проведена оценка функциональной опасности и предварительная оценка безопасности системы методом анализа дерева неисправностей.

*Ключевые слова:* система улучшенного видения, система синтезированного видения, анализ функциональных опасностей, предварительная оценка безопасности, анализ дерева неисправностей.

Тенденции развития авионики на сегодняшний день таковы, что возникает вопрос обеспечения контроля уровня безопасности всех систем летательного аппарата (ЛА) еще на стадии проектирования. Оценка безопасности должна быть интегрирована в процесс как основная задача обеспечения возможности своевременного и четкого обнаружения, классификации и анализа особых состояний, связанных с функциями ЛА. Анализ может привести к перепроектированию той или иной подсистемы для приведения ее к приемлемому уровню гарантии безопасности.

Процесс оценки безопасности носит итерационный характер и направлен на обеспечение очевидности соответствия систем летательного аппарата нормам летной годности [Александровская и др., 2010]. Он включает следующие основные составляющие (рис. 1):

- оценка функциональной опасности (ОФО, Functional Hazard Assessment — FHA);
- предварительная оценка безопасности системы (ПОБС, Preliminary System Safety Assessment — PSSA);
- оценка безопасности системы (ОБС, System Safety Assessment — SSA);
- анализ общей причины (АОП, Common Cause Analysis — CCA).

Оценка функциональной опасности предусматривает рассмотрение функций на уровне ЛА и систем, их классификацию и определение перечня возможных отказных состояний, вызванных потерей данных функций либо их некорректным выполнением. На этом этапе формируется перечень требований по безопасности. Рассмотрение должно начинаться на ранних этапах проектирования системы и продолжаться до полного исчерпания рассматриваемых функций.

Предварительная оценка безопасности системы направлена на установление требований к ее безопасности и их рассмотрение. Как и ОФО, ПОБС — итеративный процесс и должен проводиться на различных этапах проектирования.

Самым высоким уровнем системы, анализируемым на этапе ПОБС, считается сам самолет. Более низкие уровни разрабатываются на основе данных высших уровней. Исходными данными для проведения ПОБС принимаются отказные





Рис. 1. Взаимодействие процессов оценки безопасности и проектирования

состояния, идентифицированные в ходе ОФО. Могут быть рассмотрены различные методики проведения ПОБС, включая анализ дерева неисправностей (АДН), марковский анализ (МА), анализ логических схем (АЛС).

Оценка безопасности системы проводится с целью констатации, что рассматриваемая система удовлетворяет требованиям безопасности, определенным на этапе ОФО и ПОБС. ОБС объединяет результаты различных анализов по проверке безопасности системы в целом и охвата всех особенностей обеспечения безопасности, определенных в ПОБС. Основой ОБС принимаются результаты АДН, МА или АЛС.

Анализ общей причины необходим для выявления и оценки степени зависимости между функциями или блоками, а также установления уровня влияния этих зависимостей на возникновение отказных ситуаций в системе.

Рассмотрим методику оценки безопасности системы улучшенного/синтезированного (комбинированного) зрения ЛА гражданской авиации, предназначенной для обеспечения ситуационной осведомленности экипажа в условиях плохой видимости за счет использования средств технического зрения и топографической информации.

Система улучшенного видения (EVS — Enhanced Vision Systems) — это электронное средство обеспечения экипажа, полученным непосредственно от датчика

или обработанным изображением внешней обстановки. В качестве датчика изображения может использоваться: инфракрасная камера переднего обзора, радиолокатор миллиметрового диапазона и низкоуровневая телевизионная камера.

Система синтезированного видения (SVS — Synthetic Vision Systems) — это электронное средство для вывода на дисплей сформированного вычислителем изображения, соответствующего внешнему топографическому участку, наблюдаемому из кабины пилота и вычисляемому по ориентации ЛА в пространстве, по высоте, географическим координатам ЛА и топографической базе данных.

Система улучшенного/синтезированного (комбинированного) видения (CVS — Combine Vision Systems) — это комбинация подсистем искусственного и улучшенного зрения, таким образом, экипажу предоставляется совмещенное изображение от EVS и SVS. Сегодняшние концепции обычно предусматривают искусственное изображение для больших высот и улучшенную для низких вплоть до земли [КТ-315..., 2008].

ОФО системы улучшенного/синтезированного видения начинается с идентификации функций, выполняемых системой. Идентифицированные функции системы CVS включают в себя формирование:

- улучшенного изображения;
- синтезированного изображения;
- улучшенного/синтезированного (комбинированного) изображения.

При проведении оценки безопасности системы необходимо различать понятия «отказ» (событие, приводящее к прекращению или неправильному выполнению функции системой или ее частью) и «отказное состояние» (состояние в условиях воздействия на самолет и его пассажиров, как прямое, так и косвенное, вызываемое или усложняемое одним или большим числом отказов, а также неблагоприятной эксплуатацией или окружающей средой). Классификация отказных состояний приведена в «Авиационных правилах» (ч. 23, 25, 29, разд. А-0).

Таким образом, на основе списка идентифицированных функций определяется комплект отказных состояний для каждой из функций:

- формирование соответствующего дезинформирующего изображения;
- потеря соответствующего изображения;
- невозможность пилоту выключить ввод соответствующего изображения на индикатор HUD (возникновение заслоняющего изображения).

В соответствии с документом [КТ-178В] могут быть определены требования, представляющие основу дерева неисправностей:

- величина вероятности отказного состояния  $10^{-3}$  на полетный час для «потери изображения» получена из классификации условия отказа как усложняющего условия полета (индекс опасности D);
- величина вероятности отказного состояния  $10^{-5}$  на полетный час для «формирования дезинформирующего изображения» получена из классификации условия отказа как сложного (индекс опасности С);
- величина вероятности отказного состояния  $10^{-7}$  на полетный час для «возникновения заслоняющего изображения» получена из классификации условия отказа как аварийного (индекс опасности В).

Результаты ОФО становятся входными данными для проведения ПОБС. На основе составленного на стадии ОФО списка отказных состояний выполняется

дальнейшее определение возможных неисправностей. На данном этапе представляется целесообразным разбиение функциональных отказов по признаку неисправности составных частей подсистем улучшенного, синтезированного и комбинированного зрения: возникновение неисправностей в каждой из них приводит к неисправности соответствующей части системы CVS.

Дальнейший анализ проводится методом АДН [Руководство..., 2007]. В дерево неисправностей включаются события, являющиеся следствием всех причин. Такие причины должны включать результаты воздействия факторов окружающей среды или других условий, которые могут воздействовать на элемент. Развитие дерева неисправностей начинается с определения вершины событий. Для CVS вершиной события будет неисправность самой системы.

Дерево неисправностей будем строить исходя из следующих предположений:

- средства контроля обеспечивают 100%-ю полноту контроля отказов выполняющего функцию блока;
- проверка средств контроля позволяет подтвердить их полную работоспособность;
- неисправность каждого из элементов может быть рассмотрена как самостоятельное событие.

Дерево неисправностей представлено на рис. 2.

Причиной неисправности системы CVS может стать любая неисправность входящих в нее подсистем. В дальнейшем может быть произведена декомпозиция событий и определение входных причин их наступления. Однако на начальном этапе проектирования такой анализ представляется нецелесообразным. На нижнем (четвертом) уровне рассматриваются причины наступления событий третьего уровня, среди которых выделяются неисправности элементов подсистем системы CVS.

После построения дерева неисправностей проводится расчет вероятностей возникновения каждого из функциональных отказов и определяется их соответствие требованиям. Исходные данные для расчета взяты по аналогам и приведены в табл. 1.

Результат расчета приведен в табл. 2.

По данным расчета, вероятность возникновения событий «Формирование дезориентирующего изображения» превышает требуемую величину вероятности для отказа категории С. Исходя из этого, может быть определен перечень рекомендаций для дальнейших этапов проектирования:

- провести более детальный анализ дерева неисправностей блоков на следующих этапах проектирования;
- выполнить анализ чувствительности конструкции системы к специфическому проявлению отдельных первичных событий;
- по данным анализа принять решение о резервировании наименее надежных блоков подсистем SVS, EVS, CVS (сенсоров и МФИ) либо изменить состав и конфигурацию аппаратных средств и программного обеспечения.

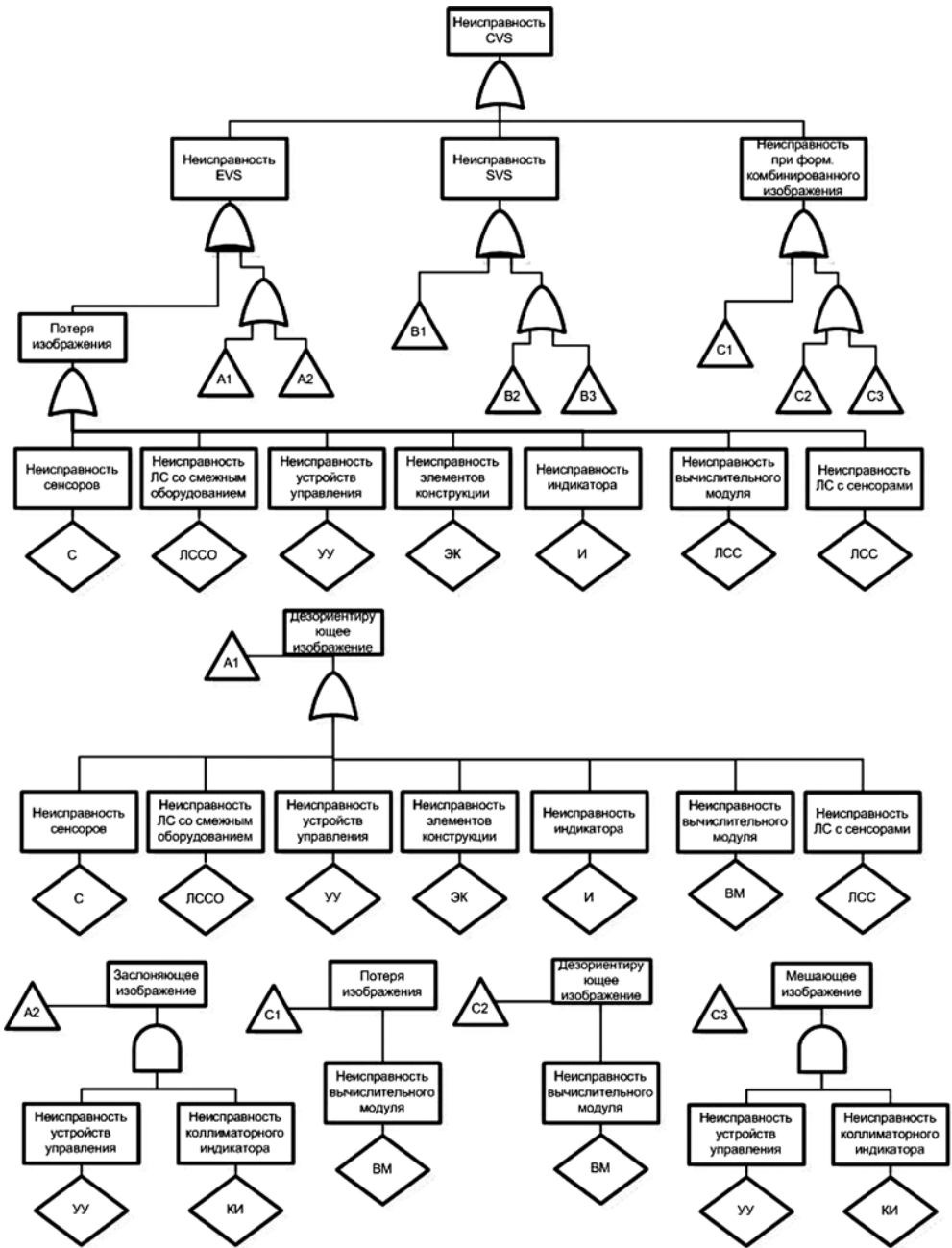


Рис. 2. Дерево неисправностей (начало)

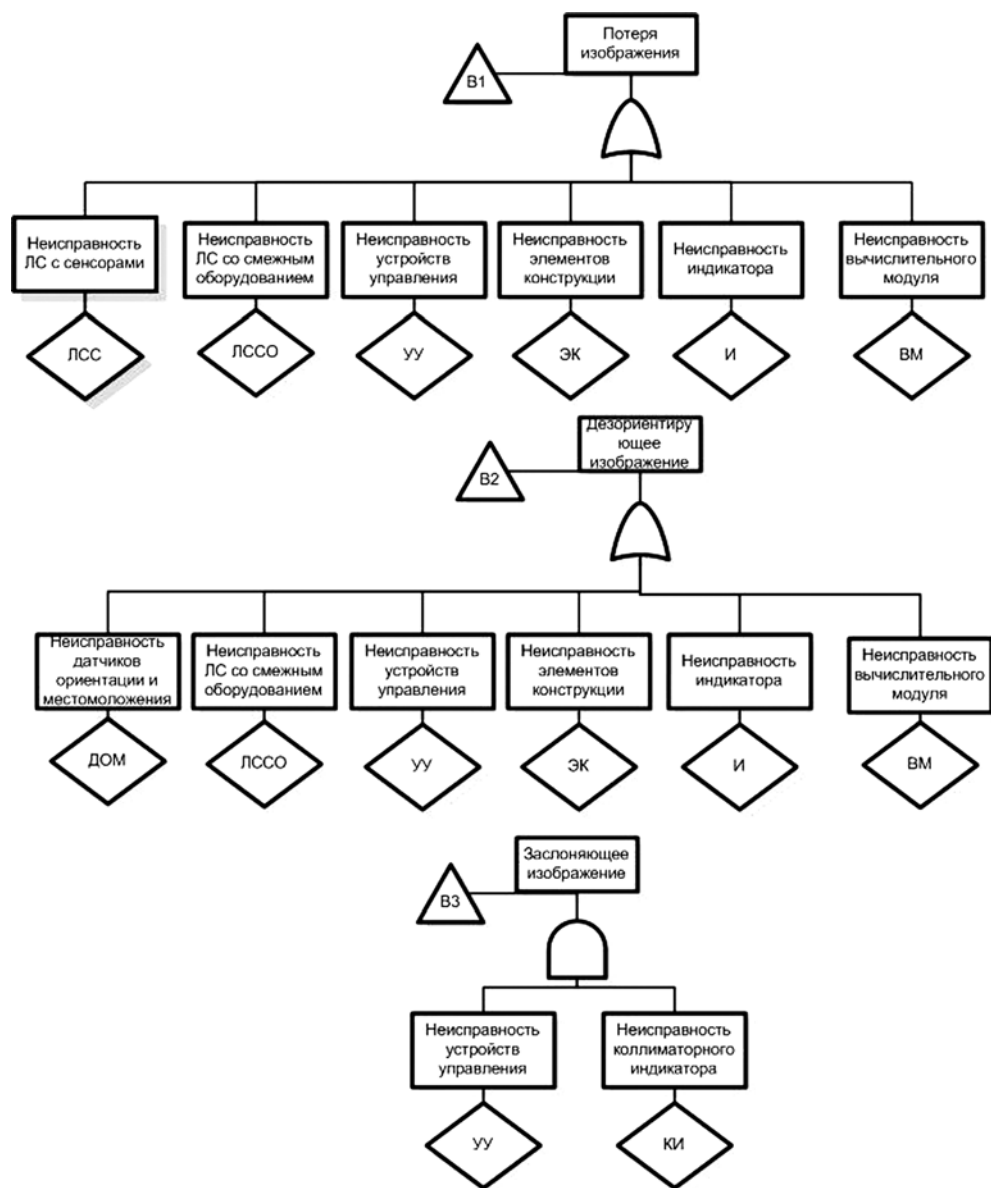


Рис. 2. Дерево неисправностей (окончание)

Таблица 1

**Интенсивность возникновения функциональных отказов**

Тип оборудования	Интенсивность, 1/с
Сенсор	$250 \cdot 10^{-6}$
Линия связи (ЛС) со смежным оборудованием	$0,08 \cdot 10^{-6}$
Устройство управления	$10^{-6}$
Элемент конструкции	$17 \cdot 10^{-6}$
Многофункциональный индикатор	$330 \cdot 10^{-6}$
Вычислительный модуль	$80 \cdot 10^{26}$
ЛС с датчиками ориентации и местоположения	$0,08 \cdot 10^{-6}$
Индикатор лобового стекла	$100 \cdot 10^{-6}$
Датчики ориентации и местоположения	$162 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

**Результат расчета вероятностей возникновения функциональных отказов**

№ события	Описание неисправности	Требование величины вероятности ОС	Расчетное значение величины вероятности ОС	Соответствие
<i>Невозможность формирования улучшенного изображения</i>				
1	Потеря изображения	$10^{-3}$	$0,678 \cdot 10^{-3}$	Да
2	Формирование дезориентирующего изображения	$10^{-5}$	$67,8 \cdot 10^{-5}$	Нет
3	Возникновение заслоняющего изображения	$10^{-7}$	$10^{-10}$	Да
<i>Невозможность формирования синтезированного изображения</i>				
4	Потеря изображения	$10^{-3}$	$0,59 \cdot 10^{-3}$	Да
5	Формирование дезориентирующего изображения	$10^{-5}$	$59 \cdot 10^{-5}$	Нет
6	Возникновение заслоняющего изображения	$10^{-7}$	$10^{-10}$	Да
<i>Невозможность формирования комбинированного изображения</i>				
7	Потеря изображения	$10^{-3}$	$80 \cdot 10^{-6}$	Да
8	Формирование дезориентирующего изображения	$10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	Нет
9	Возникновение заслоняющего изображения	$10^{-7}$	$10^{-10}$	Да

## ЛИТЕРАТУРА

- [Александровская и др., 2010] Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И.. Анализ зарубежного опыта сертификации бортовых систем воздушных судов // Тр. Московского ин-та электромеханики и автоматики / Отв. ред. Н. О. Валуев. М.: МИЭА, 2010. Вып. 2: Навигация и управление летательными аппаратами. 88 с.
- [Руководство..., 2007] Руководство № 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации / Межгосударственный авиационный комитет. Авиационный регистр. 2007.
- [КТ-178В..., 2004] КТ-178В. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники (= RTCA/DO-178V/ED-12. Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification). М.: НИИ АО, 2004.
- [КТ-315..., 2008] КТ-315. Квалификационные требования. Минимальные стандарты характеристик авиационных систем (MASPS) для систем технического зрения с расширенными возможностями визуализации, систем искусственного зрения, комбинированных систем искусственного зрения и бортовых систем технического зрения с расширенными возможностями визуализации (= RTCA DO-315. Minimum Aviation System Performance Standard (MASPS) for Enhanced Vision Systems, Synthetic Vision Systems, Combine Vision Systems and Enhanced Flight Vision Systems). М.: НИИ АО, 2008.

### THE ASSESSMENT METHOD OF ENHANCED AND SYNTHETIC VISION SYSTEM SAFETY AT FIRST DESIGN STAGES

E. V. German

*Ryazan State Instruments-Making Enterprise (GRPZ)*

At the paper some problems of safety level control for enhanced and synthetic vision system at first design stages were considered, functional hazard analysis and preliminary system safety assessment via fault tree analysis was carried out.

*Keywords:* enhanced vision system, synthetic vision system, functional hazard analysis, preliminary system safety assessment, fault tree analysis.

---

**Elena Vladimirovna German** — engineer, e-mail: elenagerman05@yandex.ru.

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМНОГО РАЗВОРОТА КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ И ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

**Ю. Б. Блохинов, М. С. Веркеенко, С. В. Скрябин,  
А. С. Чернявский, Ю. Ю. Шашов**

*Федеральное государственное унитарное предприятие «ГосНИИ авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), Москва*

Задача создания российского грузового космического корабля для Международной космической станции (МКС) была тесно связана с разработкой цифровой телевизионной системы, позволяющей автоматически измерять положение грузового корабля относительно МКС в процессе стыковки. В работе представлены методы решения задачи внешнего ориентирования, основанные на использовании высокодетальной трехмерной цифровой модели МКС. Параметры ориентирования находятся путем сравнения исходного изображения и бинарного контурного эталона, полученного путем процирования модели на плоскость изображения.

*Ключевые слова:* контурный эталон, МКС, поиск по шаблону, слежение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для осуществления автоматического сближения и стыковки космического аппарата (КА) с Международной космической станцией необходимо разработать алгоритмы, которые должны позволять в реальном времени решать задачу оценки взаимного положения. Эта задача состоит в определении углов отклонения космического аппарата (КА) от линии визирования, расстояния и радиальной скорости КА относительно МКС, а также углов разворота КА и МКС относительно друг друга. В качестве исходных данных используются видеокдры, полученные с камеры, закрепленной на борту грузового корабля, а также параметры ориентирования, измеренные навигационным оборудованием.

Процесс сближения и стыковки проходит в большом диапазоне расстояний, что приводит к существенным изменениям наблюдаемого внешнего облика МКС. Поэтому задача обнаружения и слежения должна решаться целым рядом специализированных алгоритмов компьютерного зрения в зависимости от расстояния между грузовым КА и МКС. В данной работе используется высокодетальная трехмерная модель МКС, насчитывающая более 16 000 точек.

Обнаружение и слежение за МКС осуществляется в реальном времени для каждого кадра. Точность измерений должна быть высокой. Чтобы удовлетворить этим требованиям, предложено использовать алгоритм поиска объектов на основе контуров их трехмерных моделей.

---

**Блохинов Юрий Борисович** — начальник лаборатории, кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, e-mail: yury.blokhinov@gosniias.ru.

**Веркеенко Михаил Станиславович** — инженер, e-mail: envenom.gm@gmail.com.

**Скрябин Сергей Владимирович** — инженер, e-mail: skryabin@gosniias.ru.

**Чернявский Алексей Станиславович** — инженер, e-mail: achern@gosniias.ru.

**Шашов Юрий Юрьевич** — инженер, e-mail: hepyh@yandex.ru.



## ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА КОНТУРНЫХ ЭТАЛОНАХ

### Расстояние между изображением и проецированными контурами

Поскольку трехмерная модель искомого объекта известна, то для каждого набора параметров ориентирования можно получить проецированный контур модели, называемый также контурным эталоном и включающий в себя силуэт объекта и его видимые ребра. Затем в каждой точке эталона вычисляется расстояние до ближайшего контура на изображении. Далее ведется поиск параметров ориентирования, минимизирующий сумму этих расстояний по всему эталону.

Алгоритм оценки положения с использованием контуров основан на работах [Lowe, 1991; Vacchetti et al., 2004]. Для каждой точки  $(x_0, y_0)$ , принадлежащей контурному эталону, анализируется множество точек изображения  $X_j(x_0, y_0, \theta) = (x_0 + j\cos\theta, y_0 - j\sin\theta)$ ,  $j \in [-R, R]$ , лежащих на прямой  $L_\theta$ , перпендикулярной контуру в данной точке, и отстоящих от  $(x_0, y_0)$  на расстояние, не превышающее  $R$ . В каждой точке  $X_j(x_0, y_0; \theta)$  модуль производной яркости изображения по направлению  $\theta$  сравнивается с порогом. Координаты точек, в которых модуль производной превосходит порог, заносятся в список. Затем для каждой точки  $(x_j, y_j)$ , взятой из списка, вычисляется отклонение (расстояние со знаком) от прямой линии, заданной вектором нормали с координатами  $(\cos\theta, -\sin\theta)$ , проходящей через точку  $(x_0, y_0)$ . Поиск ближайшего контура показан на рис. 1, контурный эталон указан пунктиром. Отклонение вычисляется по формуле:

$$d_j = (x_j - x_0)\cos\theta - (y_j - y_0)\sin\theta. \quad (1)$$

Функция невязки представляет собой сумму квадратов отклонений:

$$F(\mathbf{m}) = \|\mathbf{d}(\mathbf{m})\|^2. \quad (2)$$

Вектор  $\mathbf{m} = \{\omega, \varphi, \kappa, T_x, T_y, T_z\}$  содержит неизвестные параметры, определяющие положение:  $T = (T_x, T_y, T_z)^T$  — координаты наблюдателя;  $\omega, \varphi$  и  $\kappa$  — углы поворота вокруг координатных осей.

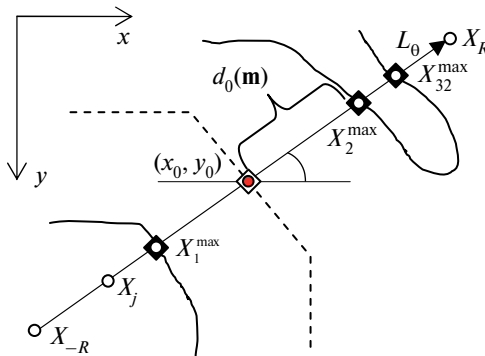


Рис. 1. Поиск ближайшего края

**Выражения для производных отклонения**

Для того чтобы вести поиск параметров положения при помощи градиентных методов оптимизации, необходимо найти трехмерные координаты точек, проекции которых принадлежат контурному эталону. Каждая точка контурного эталона описывается двумерными  $(x_i, y_i)$  и трехмерными  $(X_i, Y_i, Z_i)$  координатами. Последние вычисляются как координаты точек пересечения лучей, исходящих из точки съемки и проходящих через изображение с трехмерной моделью. Пиксельные координаты  $(x, y)$  трехмерной точки с однородными координатами  $\mathbf{x} = (X, Y, Z, 1)^T$  могут быть найдены по формулам:

$$x = \frac{u}{t}, \tag{3}$$

$$y = \frac{v}{t},$$

$$[u, v, w, t]^T = \mathbf{P}\mathbf{V}\mathbf{x}, \tag{4}$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{T} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f & 0 & -\frac{W}{2} & 0 \\ 0 & -f & -\frac{H}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z_f}{(z_f - z_n)} & \frac{-z_f z_n}{(z_f - z_n)} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

где  $\mathbf{V}$  — матрица вида;  $\mathbf{P}$  — матрица проекции;  $\mathbf{R}$  — матрица поворота;  $f$  — фокусное расстояние в пикселях,  $W$  и  $H$  — ширина и высота изображения;  $z_n$  и  $z_f$  — координаты ближней и дальней плоскостей отсечения.

Вычислив координаты любой трехмерной точки по формулам (3)-(6), можно также получить выражение для частной производной отклонения (1) по параметрам ориентирования:

$$\frac{\partial d}{\partial m_i} = -\frac{\partial x}{\partial m_i} \cos \theta + \frac{\partial y}{\partial m_i} \sin \theta, \tag{7}$$

где  $m_i$  —  $i$ -я координата вектора  $\mathbf{m}$ , а частные производные координат легко находятся из (3).

**Итерационный поиск параметров взаимного положения**

Для нахождения неизвестных параметров, доставляющих минимум функции (2), используется метод Левенберга – Марквардта [Lepetit, Fua, 2005]. В качестве начального приближения  $\mathbf{m}^0$  берутся параметры ориентирования, найденные на предыдущем кадре или предсказанные на основе нескольких предыдущих фильтром Калмана. Затем на каждой итерации вычисляется разность  $\mathbf{r} = \mathbf{d}(\mathbf{m}^i)$  и матрица частных производных  $\mathbf{J}(\mathbf{m}_i)$ , которые используются для уточнения неизвестных параметров по формулам:

$$\delta_m = -\left(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\right)^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{r}, \quad (8)$$

$$\mathbf{m}^{t+1} = \mathbf{m}^t + \delta_m. \quad (9)$$

Множитель  $\lambda > 0$  изменяется динамически. Вычисление приближенных решений продолжается до тех пор, пока невязка не станет меньше наперед заданного порога.

В реальных изображениях часто встречаются ложные контуры, на которых модуль производной яркости может быть выше, чем на истинных контурах. Поэтому для каждой точки, принадлежащей контурному эталону, необходимо рассмотреть *все* локальные максимумы производной вдоль направления  $\theta_i$  в  $R$ -окрестности точки. Это может быть сделано при помощи модифицированной функции невязки, содержащей весовую функцию, штрафующую точки, лежащие на расстоянии, превышающем некоторый порог [Vacchetti, 2004].

### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В данном исследовании сложность тестирования разработанных алгоритмов затруднялась тем, что для реальных видеопоследовательностей процесса стыковки КА не существовало точных данных по координатам и углам траектории. Поэтому для изучения поведения алгоритмов использовались модельные данные, представляющие собой изображения МКС, созданные специальным программным обеспечением с учетом реалистично заданных траекторий подлета КА к МКС. Затем алгоритм был применен к реальным видеопоследовательностям, на которых оценка точности выполнялась зрительно.

Начальная оценка положения грузового КА относительно МКС полагалась известной и использовалась для инициализации итерационного алгоритма. На рис. 2 показана начальная оценка положения МКС, наложенная в виде контура на текущее изображение. На рис. 3 приводится фрагмент рис. 2, а также фрагмент контура МКС, соответствующий параметрам ориентирования, найденным контурным алгоритмом. Визуальная оценка качества демонстрирует, что он хорошо приближается к реальным контурам МКС. Слежение за моделью проводилось в течение примерно трех минут. За это время грузовой корабль сближался с МКС по спиралевидной траектории длиной около 600 м. На рис. 4 приводится график одного из углов ориентирования в зависимости от времени. Модельная траектория показана сплошной линией, а углы, найденные предложенным алгоритмом — пунктирной. Среднеквадратичное отклонение ошибки (СКО) найденных углов ориентирования (в градусах):  $\text{СКО}(\omega) = 0,1627$ ,  $\text{СКО}(\varphi) = 0,6571$ ,  $\text{СКО}(\chi) = 0,4397$ . Эти значения признаны удовлетворительными.

Алгоритм был исследован на реальной видеопоследовательности с визуальной оценкой качества. Пиксели, лежащие под надпечатанной текстовой информацией, были исключены из рассмотрения. Высокий уровень шума, в том числе наличие на некоторых изображениях текстуры земной атмосферы, а также неблагоприятные условия освещения делают задачу слежения за МКС чрезвычайно сложной. Возможны ситуации, когда итерационный алгоритм не сходится к верному минимуму, что может быть вызвано присутствием ложных контуров, таких как элементы объекта, параллельные истинным контурам. Ложные контуры также часто вызваны затенением. Пример успешной подгонки контурного эталона к реальному видеокадру показан на рис. 5.

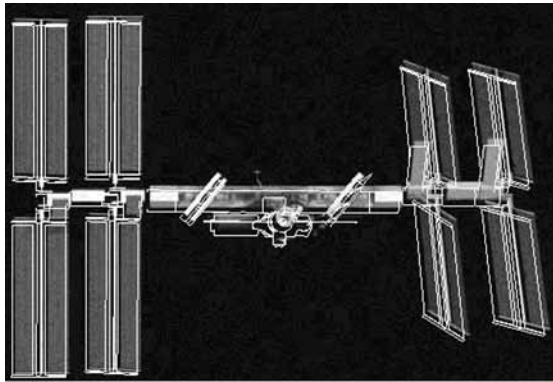


Рис. 2. Контур, соответствующий начальной оценке положения

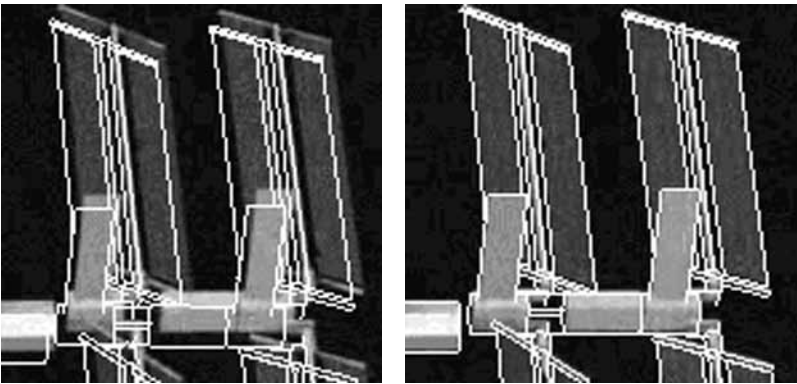


Рис. 3. Начальное приближение (слева) и положение фрагмента МКС, найденное предложенным алгоритмом (справа)

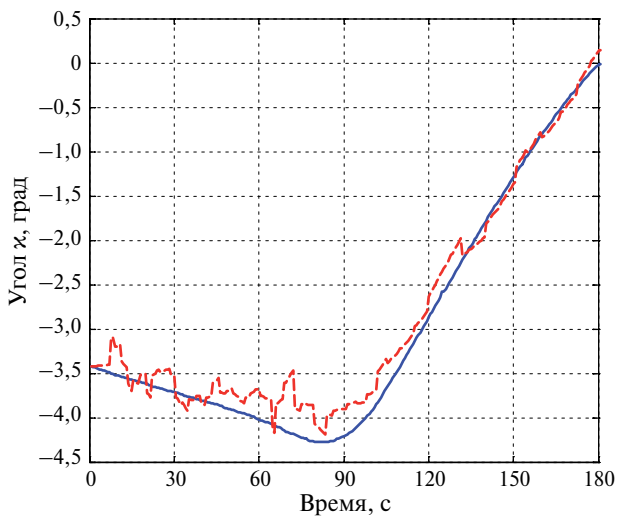


Рис. 4. Найденный угол ориентирования  $x$



**Рис. 5.** Начальное приближение (слева) и положение фрагмента МКС, найденное предложенным алгоритмом (справа)

## ВЫВОДЫ

В работе был представлен метод оценки параметров ориентирования, основанный на использовании высокодетальной цифровой модели МКС. Для определения взаимного положения КА и МКС использовался алгоритм, минимизирующий расстояния между контурным эталоном МКС, построенным по высокодетальной трехмерной модели, и контурами изображения.

Результаты тестирования на модельных данных позволяют сделать положительный вывод о том, что представленные в статье методы могут быть использованы для алгоритмической поддержки процедуры автоматического сближения и стыковки. Использование модели с переменной детальностью, зависящей от расстояния до МКС, может повысить скорость и точность слежения. Для повышения точности оценки параметров траектории грузового КА относительно МКС также желательно использовать навигационные данные. Вопрос о наилучшей комбинации алгоритмов на разных стадиях сближения и их реализуемость на бортовых вычислительных системах требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00703-а).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Lepetit, Fua, 2005] *Lepetit V., Fua P.* Monocular model-based 3D tracking of rigid objects: a survey // *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*. 2005. V. 1. P. 1–89.
- [Lowe, 1991] *Lowe D.G.* Fitting parameterized three-dimensional models to images. // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991. V. 13. P. 441–450.
- [Vacchetti et al., 2004] *Vacchetti L., Lepetit V., Fua P.* Combining edge and texture information for real-time accurate 3D camera tracking // *Proc. Intern. Symp. Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. 2004. P. 48–57.

**AUTOMATIC ESTIMATION OF THE MUTUAL POSITION  
OF A SPACESHIP AND ORBITAL STATION USING  
COMPUTER VISION METHODS**

**Yu. B. Blohinov, M. S. Verkeenko, S. V. Skryabin, A. S. Chernyavskiy,  
Yu. Yu. Shashov**

*State Research Institute of Aviation Systems ("GosNIAS"), Moscow*

The technical problem of creating the new Russian version of an automatic Space Cargo Ship (SCS) for the International Space Station (ISS) is inseparably connected to the development of a digital video system for automatically measuring the SCS position relative to ISS in the process of spacecraft docking. This paper presents a method for estimating the orientation elements based on the use of a highly detailed digital model of the ISS. Orientation elements are found by comparing the image with a binary contour template which is obtained by projecting the three-dimensional model on the image plane.

*Keywords:* contour template, ISS, template-based search, model-based tracking.

---

**Blohinov Yuriy Borisovich** — head of laboratory, doctor of technical sciences, e-mail: yury.blokhinov@gosnias.ru.

**Verkeenko Mikhail Stanislavovich** — engineer, e-mail: envenom.gm@gmail.com.

**Skryabin Sergey Vladimirovich** — engineer, e-mail: skryabin@gosnias.ru.

**Chernyavskiy Alexey Stanislavovich** — engineer, e-mail: achern@gosnias.ru.

**Shashov Yuriy Yurievich** — engineer, e-mail: hepyh@yandex.ru.

## АВТОНОМНЫЙ ПРИБОР ОРИЕНТАЦИИ НА СОЛНЦЕ

В. Д. Глазков, В. А. Котцов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

Обоснована необходимость построения автономного прибора ориентации на Солнце для научных космических платформ. Показаны различные варианты его дизайна. Приведены блок-схема и апертурные характеристики основных функциональных звеньев прибора.

*Ключевые слова:* прибор ориентации на Солнце, научная космическая платформа, микро-, нано- и пико-спутники XXI века, апертурные характеристики прибора.

Изначально предложение о создании автономного прибора ориентации на Солнце было сформулировано и обосновано авторами в 1996 г.; второй раз изложено в 2004 г., когда закладывался проект ЧИБИС. Альтернативой является широко используемый, но более тяжелый камерный вариант оптического солнечного датчика с ПЗС — линейкой. Они использовались, например, на межпланетной станции «Фобос-Грунт», где было установлено четыре таких оптических солнечных датчика (ОСД). Основные параметры этих ОСД: масса 0,65 кг; энергопотребление 4 Вт [Аванесов и др., 2009]. В настоящее время это практически весь арсенал в части солнечных датчиков, которыми располагает РАН для установки на научных космических платформах. Чтобы расширить их приборный состав, авторами предлагается концепция автономного прибора солнечной ориентации массой значительно меньшей, чем ОСД [Котцов, Глазков, 2007].

В принципе, задача создания автономного прибора ориентации на Солнце для малых космических платформ уже решена. Пример тому — изделия Нидерландской организации прикладных научных исследований и сертификации TNO [Глазков, 2011a]. Задача состоит в том, чтобы сделать такой прибор еще легче без ущерба для остальных его характеристик.

По мнению авторов, следует начать широко использовать тонкослойные широкозонные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) нового поколения, и за счет их внедрения в бортовые изделия реализовать вариант бескамерного автономного прибора ориентации на Солнце (АПОС). В СССР получение широкозонных полупроводниковых материалов и изготовление ФЭП в виде тонкослойных плоских диодных структур было успешно реализовано еще в 1980-х гг. [Глазков, Котцов, 2009]. Однако массовому их использованию помешали перестройка и последующие события в стране.

Именно использование широкозонных ФЭП в виде плоских тонкослойных диодных каскадных структур позволяет создать компактный и очень легкий бортовой измерительный инструмент нового поколения — бескамерный автономный прибор ориентации на Солнце. Следует отметить, что для построения такого прибора с массой не более 50 г лучше всего подходят в качестве чувствительных элементов многогранные (фасеточные) зрительные структуры [Глазков, 2011b].

---

Глазков Вячеслав Данилович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, email:vdglazkov@gmail.com.

Котцов Владимир Александрович — научный сотрудник, e-mail:vladkott@mail.ru.

Пути и способы разрешения проблем, которые при этом могут возникать, приведены в таблице.

### Пути и способы разрешения проблем при построении АПОС

№ п/п	Проблема	Пути и способы разрешения проблем
1	Малая масса и компактность прибора	Реализуются при бескамерном принципе построения прибора на основе фасеточных зрительных структур
2	Низкое потребление энергии прибором	Достигается с помощью широкозонных ФЭП и способов обработки их токов, выбором преобразователей форм
3	Большое поле обзора прибора	Определяется числом ФЭП, различным наклоном и ориентацией их в многогранном приборном пространстве
4	Высокая линейность и точность измерения	Достигается числом и типом выбранных ФЭП, коррекцией апертурных характеристик и балансом их пар
5	Малое влияние отраженного света на результат	Реализуется с помощью широкозонных ФЭП при их работе в теллурических областях солнечного спектра планет
6	Большой температурный диапазон работы	Определяется типами широкозонных ФЭП, выбором элементов для С в К, а также дизайном прибора в целом
7	Большой ресурс работы прибора в полете	Достигается выбором типов ФЭП, балансировкой токов их пар в полете и использованием в приборе С в К
8	Реальный масштаб времен по части результатов	Определяется выбором типа ФЭП, принципом обработки их фототоков, преобразователем формы сигналов
9	Энергонезависимость от КА — автономия прибора	Реализуется за счет местного солнечного источника питания и использования стабилизатора тока в приборе
10	Гальваническая развязка прибора от КА	Достигается путем использования в приборе беспроводных интерфейсных устройств с узкими диаграммами излучения

Возможные варианты дизайна АПОС, реализуемых с помощью фасеточных зрительных структур с использованием тонкослойных широкозонных ФЭП показаны на рис. 1.

Реализация АПОС массой не более 50 г рассмотрена в [Глазков, 2011а]. Она сводится к фиксации на гранях бескамерной конструкции из одной (рис. 1а) или нескольких усеченных пирамид (рис. 1б–д) ФЭП, которые, как правило, представляют собой каскадные (с разными рабочими зонами по солнечному спектру) вертикальные диодные композиции. При этом каскадные ФЭП, определенным образом ориентированные и взаимосвязанные, выполняют две различные функции: солнечного датчика — верхний каскад и солнечного электрогенератора (источника питания) — нижний каскад. Такой вариант позволяет минимизировать массу и объем прибора, увеличить его надежность и сделать независимым от бортового электропитания космического аппарата (вид сверху такого АПОС показан на рис. 1б)). Однако в настоящее время реализация разовых автономных многоярусных приборов ориентации на Солнце каскадной диодной композиции с ультра малой массой и большими полями обзора требует существенных затрат, если в них используются дефицитные на сегодня тандемные ФЭП.

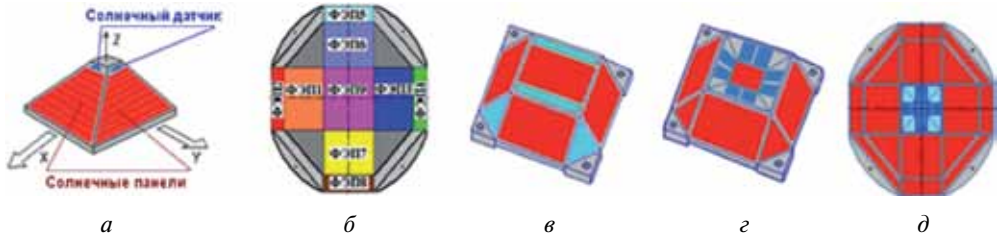
Рассмотрим более доступные, «бюджетного типа» варианты построения двухосного АПОС. Тандемные ФЭП в приборе заменяются на отдельные планарные элементы — технологически отработанные и реализуемые серийно различные тонкослойные полупроводниковые фотопреобразующие структуры. Они выполняют функции датчика и солнечных элементов — основы источника питания.



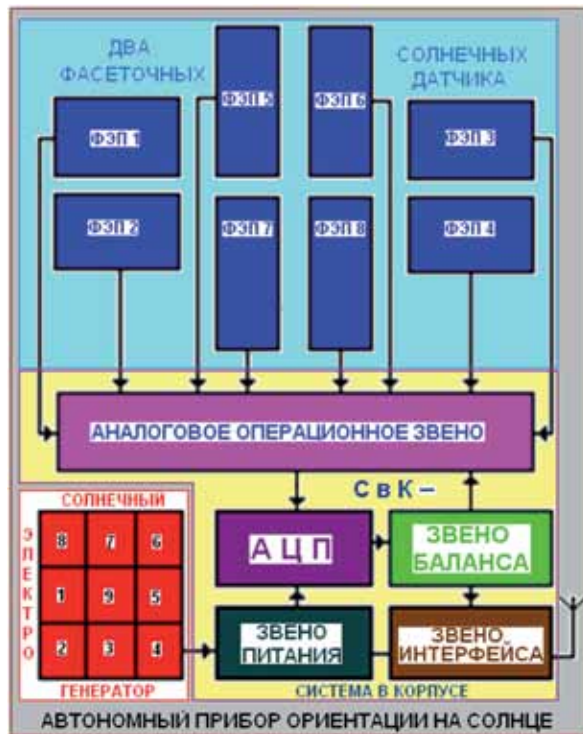
Тем самым разрешаются проблемы дефицита тандемных ФЭП и относительно высокой стоимости разовых многоярусных изделий каскадной композиции.

Один из вариантов двухосного моноблочного одноярусного АПОС «бюджетного типа» конструктивно представляет собой четырехгранную равнобедренную усеченную пирамиду со срезанными под определенным углом ребрами, где размещаются планарные ФЭП солнечного датчика, а плоские элементы солнечного источника питания крепятся на ее гранях. Общий вид АПОС показан на рис. 1в.

Другой пример решения АПОС, дизайн которого в виде двух вложенных пирамид представлен на рис. 1г, демонстрирует иную компоновку изделия. Блок-схема такого прибора приведена на рис. 2, а апертурные характеристики основных звеньев: солнечного датчика и солнечного источника питания на рис. 3а и б.



**Рис. 1.** Варианты дизайна АПОС массой не более 50 г: *а* — усеченная пирамида; *б* — каскад из двух усеченных пирамид; *в* — усеченная пирамида со срезанными ребрами; *г* — вложенные усеченные пирамиды; *д* — конструкция из четырех усеченных пирамид



**Рис. 2.** Блок-схема АПОС «бюджетного типа»

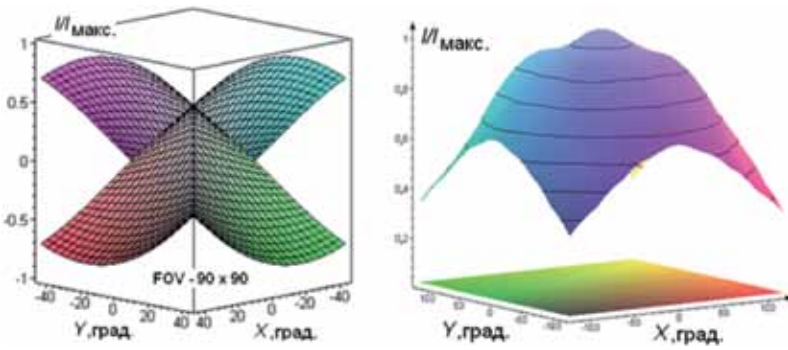


Рис. 3. Апертурные характеристики основных звеньев одного из вариантов АПОС: *а* — солнечного датчика по двум координатам *X* и *Y* прибора; *б* — солнечного источника питания по двум координатам *X* и *Y* прибора

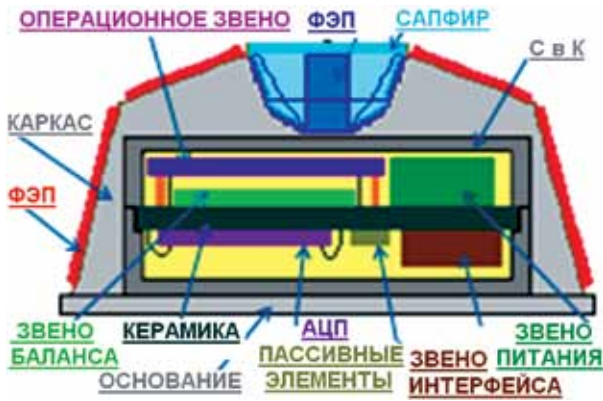


Рис. 4. Разрез АПОС: ФЭП — фотоэлектрический преобразователь; С в К — система в корпусе

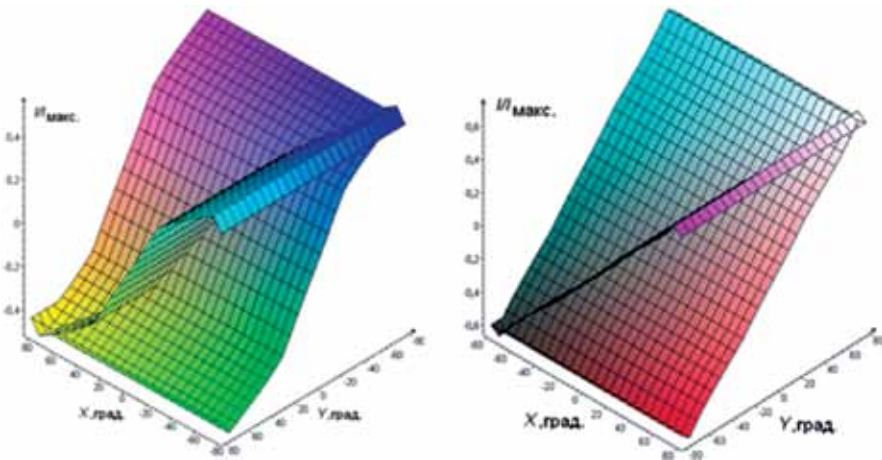


Рис. 5. Апертурные характеристики солнечного датчика АПОС: *а* — до коррекции; *б* — после коррекции

Еще один пример дизайна АПОС, который позволяет корректировать апертурные характеристики солнечного датчика, показан на рис. 1д. Прибор в разрезе приведен на рис. 4, а апертурные характеристики его солнечного датчика до и после коррекции — на рис. 5а и б.

## ВЫВОДЫ

- Наиболее важным служебным инструментом научной космической платформы представляется система ориентации;
- надежность функционирования ее звеньев, определяющих положение в пространстве, и исполнительного органа, слаженность их взаимодействия обеспечивает решение главной задачи космической миссии. В случае отказа любого элемента научная платформа становится космическим мусором;
- при решении научных и прикладных задач в пределах солнечной системы наиболее востребованным инструментом системы ориентации космического аппарата будет прибор, определяющий направление на Солнце;
- надежность его функционирования напрямую связана с независимостью от сторонних посредников, и в нем должна отсутствовать любая избыточность (функциональная, аппаратная и программная), что достигается автономией изделия;
- предельная компактность и малая масса автономного прибора ориентации на Солнце проще всего реализуются при бескамерном варианте его исполнения в виде фасеточных зрительных структур. Временно допускается, что в целях повышения надежности системы активные электронные компоненты будут заключены в локальную камеру малых размеров — система в корпусе (С в К);
- при ограничениях по массе и объему автономного прибора ориентации на Солнце варианты его дизайна в виде различных фасеточных зрительных структур следует рассматривать как компромисс между желаемыми и возможными решениями конкретной технической задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Аванесов и др., 2009] *Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Зарецкая Е. В., Куделин М. И., Никитин А. В., Форш А. А.* Оптический солнечный датчик. Особенности конструкции и испытательного оборудования // Всерос. научно-тех. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: Сб. тр. Россия, Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 78–89. (Сер. «Механика, управление и информатика».)
- [Глазков, 2011а] *Глазков В. Д.* Автономный фасеточный солнечный датчик // Всерос. научно-тех. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов»: Сб. тр. Россия, Таруса, 13–16 сент. 2010. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 149–159. (Сер. «Механика, управление и информатика».)
- [Глазков, 2011б] *Глазков В. Д.* Фасеточные солнечные датчики и их возможности // Всерос. научно-тех. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов»: Сб. тр. Россия, Таруса, 13–16 сент. 2010. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 160–173. (Сер. «Механика, управление и информатика».)

- [Глазков, Котцов, 2009] *Глазков В.Д., Котцов В.А.* Фасеточные датчики солнечной ориентации // Всерос. научно-тех. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: Сб. тр. Россия, Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 136–145.
- [Котцов, Глазков, 2007] *Котцов В.А., Глазков В.Д.* Солнечный датчик с интеллектуальными способностями // Космическое приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космических технологий. Приборы для космических исследований планет и Земли: Сб. тр. по результатам выездного семинара. Россия, Таруса, 7–9 июня 2006 / Под ред. Назирова Р. Р. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 114–119.

## AUTONOMOUS DEVICE OF ORIENTATION TO THE SUN

**V. D. Glazkov, V. A. Kottsov**

*Space Research Institute (IKI RAN), Moscow*

The authors substantiate the necessity of building a stand-alone instrument of orientation to the Sun for on-board scientific space platforms Russian ACADEMY of sciences. Shows the various variants of design of the instrument. Shows the block diagram and complex directional characteristics of its main functional links.

*Keywords:* the instrument of orientation to the Sun, scientific space platform, micro- nano- and pico-satellites of the twenty-first century, complex directional characteristics of the device.

---

**Glazkov Vyacheslav Danilovich** — senior researcher, candidate of technical science, e-mail:vdglazkov@gmail.com.

**Kottsov Vladimir Alexandrovich** — researcher, e-mail:vladkott@mail.ru.

## АЛГОРИТМЫ НАВЕДЕНИЯ И ГИРОСИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ СПУТНИКОВ ЗЕМЛЕОБОЗОРА ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКЕ

**Е. И. Сомов, С. А. Бутырин**

*Научно-исследовательский институт Проблем надежности механических систем Самарского государственного технического университета (СамГТУ)*

Представлены алгоритмы наведения космического аппарата (КА) при сканирующей оптико-электронной съемке поверхности Земли и поворотных маневрах. Описываются алгоритмы дискретной фильтрации измерений бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и гиросилового управления КА.

*Ключевые слова:* космическая сканирующая съемка, наведение, гиросиловое управление.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается космический аппарат землеобзора, оснащенный телескопом с матрицами оптико-электронных преобразователей (ОЭП) в его фокальной плоскости. При съемке заданных участков поверхности Земли совокупностью маршрутов их сканирования телескопом (рис. 1) матрицы ОЭП работают в режиме временного запаздывания и накопления (ВЗН). Используются стандартные системы координат (СК) — инерциальная (ИСК, базис  $\mathbf{I}_\oplus$ ) с началом в центре Земли  $O_\oplus$ , Гринвичская геодезическая (ГГСК, базис  $\mathbf{E}$ ), горизонтная (ГСК, базис  $\mathbf{H} = \{\mathbf{h}_i\}$ ) с эллипсоидальными геодезическими координатами  $L$ ,  $B$  и  $H$ , орбитальная (ОСК) и связанная с КА (ССК, базис  $\mathbf{V}$ ) системы координат с началом в его центре масс  $O$ .



**Рис. 1.** Схема сканирования целей

Вводятся телескопная СК (ТСК, базис  $\mathbf{S} = \{s_i\}$ ) с началом в центре оптического проектирования  $S$  (см. рис. 1), СК поля изображения  $O_i x_i^i y_i^i z_i^i$  (ПСК, базис  $\mathbf{F}$ ) с началом в центре  $O_i$  фокальной плоскости телескопа, визирная СК (ВСК, базис  $\mathbf{V}$ ) с началом в центре  $O_v$  матрицы ОЭП, а также базисы бесплатформенной инерциальной навигационной системы — гироскопического блока  $\mathbf{G}$  и астрономической системы (АС)  $\mathbf{A}$  на основе звездных датчиков с широким полем зрения, рис. 2, 3.

**Сомов Евгений Иванович** — начальник отдела наведения, навигации и управления движением, старший научный сотрудник, доцент, кандидат технических наук, e-mail: e\_somov@mail.ru.

**Бутырин Сергей Анфимович** — начальник лаборатории моделирования систем управления, старший научный сотрудник, доцент, кандидат технических наук, e-mail: butyrinsa@mail.ru.

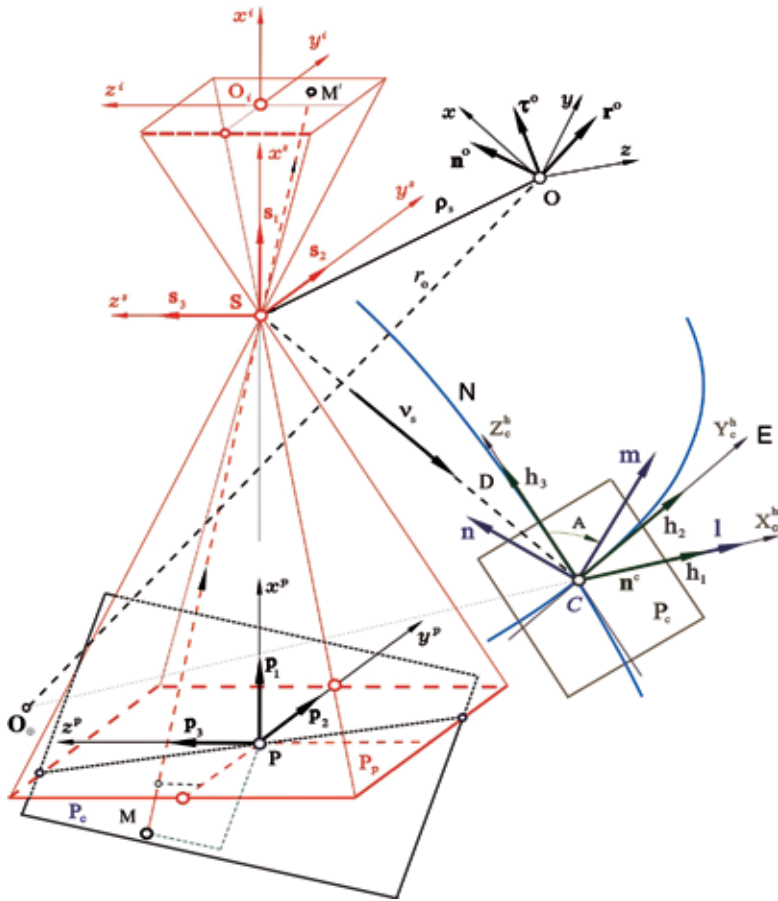


Рис. 2. Схема формирования изображения

На поверхности Земли маршрут съемки отображается следом проекций ОЭП, составляя полосу захвата. Маршруту съемки соответствует закон (алгоритм) углового наведения КА в функции времени, при котором происходит требуемое движение получаемого оптического изображения по фото-приемной поверхности ОЭП. При известном орбитальном движении центра масс КА рассматриваются такие принципиально важные задачи:

- анализ поля скоростей движения изображения (СДИ) наземных объектов на матрицах ОЭП с ВЗН для трассовых, геодезических и протяженных криволинейных маршрутов с выравниванием продольной СДИ;
- синтез законов наведения КА в ИСК, обеспечивающих в общем случае последовательность маршрутов съемки участков земной поверхности с заданной протяженностью, которые необходимы для формирования изображений земных площадей и получения их стереоизображений;
- оптимизация азимута объектовой съемки (короткого маршрута);
- синтез законов наведения КА при его пространственных поворотных маневрах (ПМ) с крайевыми условиями общего вида;
- синтез алгоритмов долгосрочного планирования с согласованными функциями наземного (НКУ) и бортового (БКУ) комплексов управления;

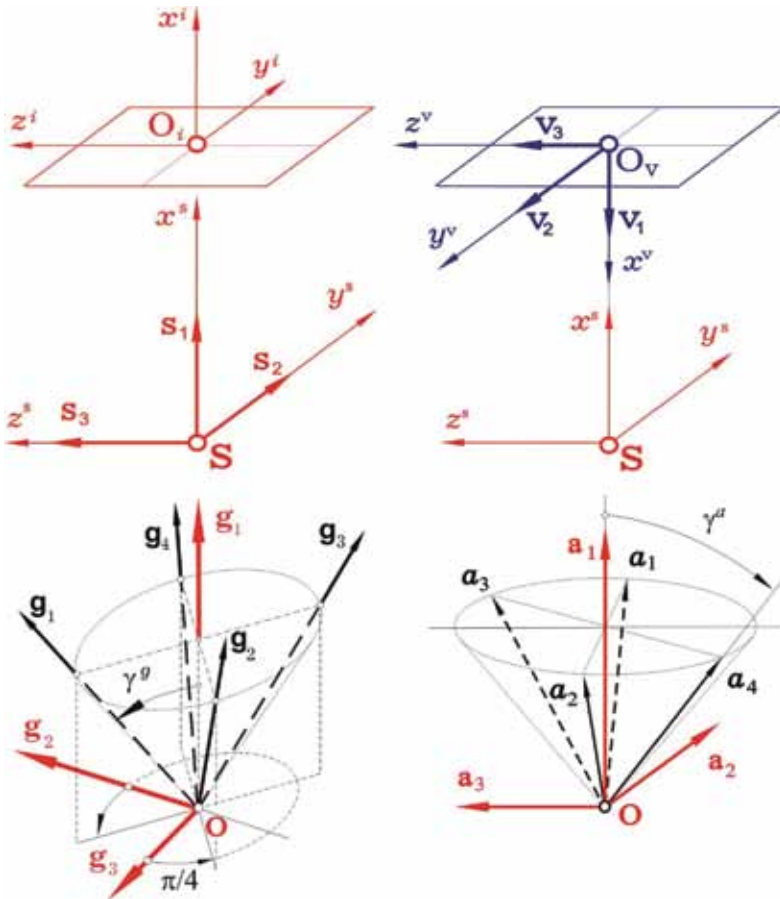


Рис. 3. Базисы S, F, V, G и A

- синтез алгоритмов дискретной фильтрации измерений гироблока БИНС с его коррекцией сигналами АС и алгоритмов цифрового гиросилового управления КА в процессе сканирующей съемки.

### АНАЛИЗ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СИНТЕЗ ЗАКОНОВ НАВЕДЕНИЯ

С применением известных приемов космической геодезии авторами созданы аналитические методики синтеза алгоритмов наведения КА при сканирующей съемке, основанные на методах анализа поля СДИ наземных объектов на матрицах ОЭП с ВЗН. Задача вычисления кватерниона ориентации  $\Lambda$  связанного базиса  $\mathbf{B}$  относительно инерциального базиса  $\mathbf{I}_0$ , векторов угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}$  и ускорения  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , как явных функций на заданном интервале времени, решается на основе векторного сложения всех элементарных движений телескопа (ТСК) в ГГСК с учетом текущей перспективы наблюдения при задании начальных координат наземного объекта и потребного геодезического азимута  $A$  сканирования (см. рис. 2).

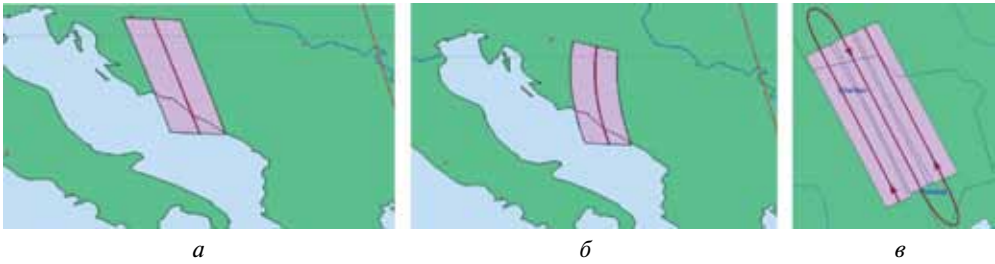


Рис. 4. Маршруты трассовой (а), с выравниванием СДИ (б) и площадной (в) съемки

Пусть векторы-столбцы  $\omega_e^s$  и  $v_e^s$  представляют в ТСК соответственно угловую скорость и скорость движения центра масс КА относительно ГГСК, матрица  $\tilde{C} = \|\tilde{c}_{ij}\|$  определяет ориентацию ТСК относительно ГСК, а скалярная функция  $D(t)$  представляет дальность наблюдения вдоль оси визирования. Тогда для любой точки в фокальной плоскости телескопа продольная  $\tilde{V}_y^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i)$  и поперечная  $\tilde{V}_z^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i)$  составляющие вектора нормированной СДИ вычисляются по векторно-матричному соотношению:

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_y^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i) \\ \tilde{V}_z^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{y}}^i \\ \dot{\tilde{z}}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{y}^i & 1 & 0 \\ \tilde{z}^i & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q^i \tilde{v}_{e1}^s - \tilde{y}^i & \omega_{e3}^s + \tilde{z}^i \omega_{e2}^s \\ q^i \tilde{v}_{e2}^s - & \omega_{e3}^s - \tilde{z}^i \omega_{e1}^s \\ q^i \tilde{v}_{e1}^s + & \omega_{e2}^s + \tilde{y}^i \omega_{e1}^s \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $\tilde{y}^i = y^i/f_e$  и  $\tilde{z}^i = z^i/f_e$  — нормированные фокальные координаты указанной точки, где  $f_e$  — эквивалентное фокусное расстояние телескопа, скалярная функция  $q^i = 1 - (\tilde{c}_{21}\tilde{y}^i + \tilde{c}_{31}\tilde{z}^i)/\tilde{c}_{11}$  и компоненты вектора нормированной скорости поступательного движения  $\tilde{v}_{ei}^s = v_{ei}^s(t)/D(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ . На основе (1) получают искомые компоненты вектора-столбца  $\omega_e^s$  с помощью численного интегрирования кватернионного уравнения. Далее набором векторных сплайнов третьего порядка выполняется высокоточная аппроксимация компонентов кватерниона  $\Lambda(t)$  и аналитически в явном виде получают векторы  $\omega(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  и  $\dot{\varepsilon}(t)$  [Сомов, 2007]. Созданные методы конкретизированы для трассовых (рис. 4а), протяженных криволинейных маршрутов с выравниванием продольной СДИ [Somov et al., 2008] (рис. 4б), для площадного землеобзора [Сомов и др., 2011] с последовательностью геодезических маршрутов (рис. 4в), а также для получения стереоизображений выбранных наземных объектов.

### ОПТИМИЗАЦИЯ АЗИМУТА ОБЪЕКТОВОЙ СЪЕМКИ

Оптимизация начального геодезического азимута  $A_0$  объектовой съемки состоит в минимизации суммы квадратов поперечных СДИ  $V_z^i(0, \pm l/2)$  на краях матрицы ОЭП общей длины  $l$  [Somov et al., 2011]. Результаты решения этой задачи представлены на рис. 5 — поверхность оптимального относительного азимута маршрута



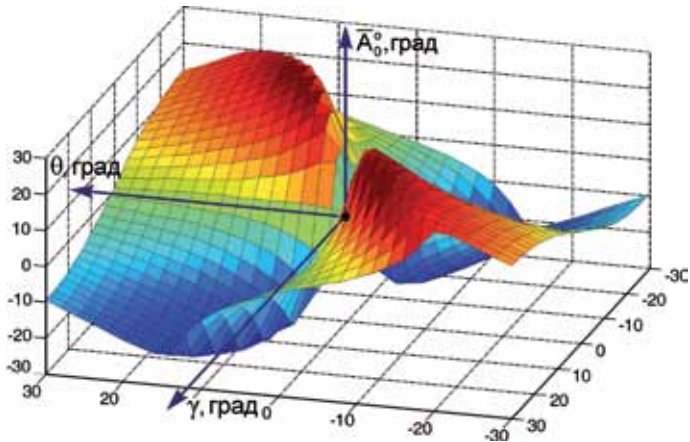


Рис. 5. Поверхность оптимального азимута

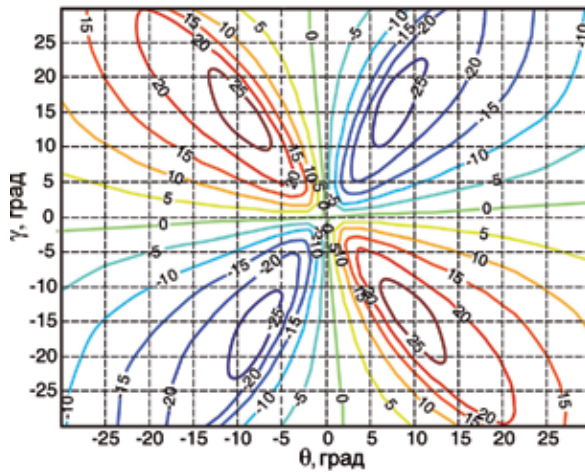


Рис. 6. Номограмма

$\bar{A}_0^o = A_0^o - A_f$ , с азимутом трассы  $A_f$  в зависимости от углов ориентации ССК относительно ОСК, и на рис. 6 — номограмма для определения оптимального азимута  $\bar{A}_0^o$ .

### СИНТЕЗ ЗАКОНОВ НАВЕДЕНИЯ КА ПРИ ПОВОРОТНЫХ МАНЕВРАХ

Задача синтеза закона наведения КА при пространственном ПМ состоит в определении кватерниона  $\Lambda(t)$  ориентации ССК относительно ИСК, векторов угловой скорости  $\omega(t)$  и ускорения  $\varepsilon(t)$  на интервале времени  $t \in T \equiv [t_0, t_f]$  длительности  $T = t_f - t_0$  для кинематических соотношений

$$\dot{\Lambda}(t) = \frac{1}{2} \Lambda(t) \circ \omega(t), \quad \dot{\omega}(t) = \varepsilon(t), \quad \dot{\varepsilon}(t) \equiv \mathbf{v} = \varepsilon^*(t) + \omega(t) \times \varepsilon(t) \quad (2)$$

с краевыми условиями общего вида и ограничением на модуль вектора угловой скорости  $|\boldsymbol{\omega}(t)| \leq \omega^*$ ,  $t_0 \leq t \leq t_f$ . В работе [Somov, 2008] представлено решение этой задачи из условия минимизации квадратичного критерия.

### АЛГОРИТМЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ЦЕЛЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Разработанная технология планирования целевых задач КА реализуется в НКУ и БКУ. При этом операторы НКУ выбирают последовательность, виды и методы информационного обслуживания наземных объектов на предстоящем интервале времени полета КА и далее [Сомов, Бутырин, 2009]:

- выполняется прогноз орбитального движения центра масс КА на 1 сут вперед с использованием сигналов спутниковых навигационных систем на нескольких предыдущих орбитах КА;
- для суточного плана наблюдений синтезируются законы наведения КА с гладким сопряжением граничных условий маршрутных движений и ПМ;
- выполняется аппроксимация маршрутов и ПМ векторными сплайнами, определяется набор базисных векторов этих сплайнов;
- по аналитическим соотношениям проверяется реализуемость маршрутов и ПМ, выполняемых силовым гироскопическим комплексом (СГК);
- проводится «упаковка» базисных векторов сплайнов всех маршрутов и ПМ, а также служебных команд, в пакет параметров единого закона углового наведения КА на предстоящем суточном интервале, передаваемый на борт КА.

В БКУ по явным соотношениям воспроизводится единый закон углового наведения КА при формировании цифрового управления СГК.

### АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ И ЦИФРОВОГО ГИРОСИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритмы фильтрации измерений БИНС с коррекцией сигналами от АС и гиросилового управления ориентацией КА в процессе сканирующей съемки представлены в работах [Сомов, Бутырин, 2010; Somov et al., 2008].

На рис. 7 и 8 представлены результаты компьютерной имитации работы БИНС при наличии двух временных интервалов, когда модуль вектора угловой

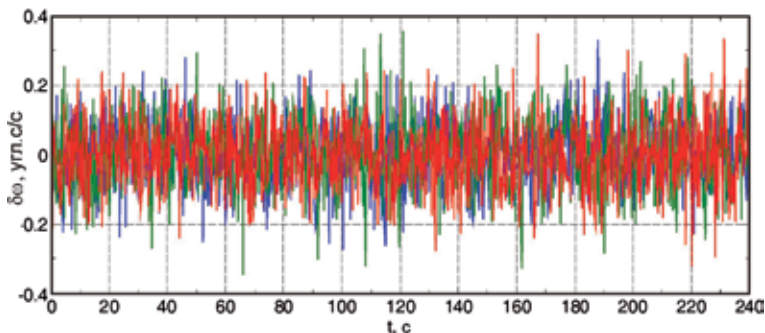


Рис. 7. Погрешности оценки компонентов вектора угловой скорости

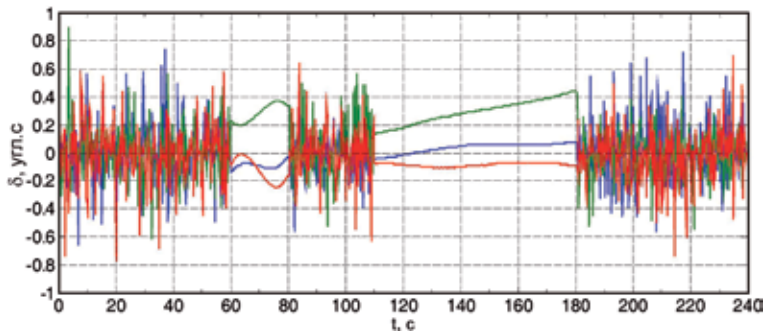


Рис. 8. Погрешности оценки компонентов вектора углового положения

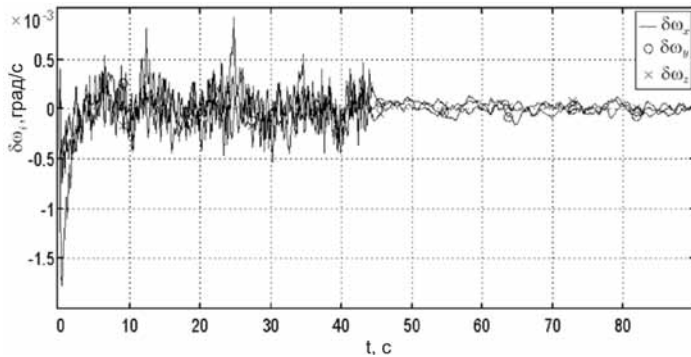


Рис. 9. Ошибки стабилизации КА по скорости в последовательности ПМ и маршрута

скорости КА превышает значение 0,5 град/с, и коррекция дрейфа гироблока БИНС сигналами от АС на этих интервалах отключается.

На рис. 9 представлены погрешности силовой гироскопической стабилизации КА по угловой скорости в последовательности ПМ на интервале [0, 45] с и маршрута съемки на полуинтервале (45, 90] с.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ КА НА КАЧЕСТВО СНИМКОВ

Влияние погрешностей угловой стабилизации КА на качество снимков, получаемых при сканирующей съемке, учитываются соответствующим компонентом оптической передаточной функции сквозного тракта формирования электронного изображения. Методы прямой оценки работы системы управления КА представлены в работе [Сомов, Бутырин, 2012].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко представлены законы наведения КА при сканирующей оптико-электронной съемке поверхности Земли, алгоритмы дискретной фильтрации измерений БИНС с астрономической коррекцией и цифрового гиросилового управления

ориентацией КА. Приведены некоторые результаты апробации созданных алгоритмов для перспективного КА землеобзора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-01037) и отделения ЭМПУ РАН (программа фундаментальных исследований № 14).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Сомов, 2007] *Сомов Е. И.* Аналитический синтез законов гиросилового наведения космических аппаратов информационного назначения // Сб. материалов 14-й Санкт-Петербургской международной конф. по интегрированным навигац. системам. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2007. С. 90–92.
- [Сомов, Бутырин, 2009] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Экономичные способы обеспечения высокой информативности землеобзора при гиросиловом наведении космических аппаратов // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. Т. 11. № 3. С. 141–152.
- [Сомов, Бутырин, 2010] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Цифровая обработка сигналов, калибровка и юстировка бесплатформенной инерциальной системы для определения ориентации маневрирующего космического аппарата // Сб. материалов 17-й Санкт-Петербургской международной конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. С. 75–77.
- [Сомов, Бутырин, 2012] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Комплексирование наблюдательной и навигационной информации для верификации работы системы управления спутника и улучшения измерительных свойств космических снимков // Сб. тр. научно-технич. конф. «Техническое зрение в системах управления 2011». М.: ИКИ РАН, 2012. С. 138–142.
- [Сомов и др., 2011] *Сомов Е. И., Бутырин С. А., Бутко А. В.* Гиросиловое наведение спутника при площадном землеобзоре на основе последовательности маршрутов сканирующей съемки // Сб. материалов 17-й Санкт-Петербургской международной конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2011. С. 267–276.
- [Somov, 2008] *Somov Ye. I.* Optimal synthesis of gyromoment guidance and control for spacecraft and free-flying robots // Proc. 6<sup>th</sup> European Nonlinear Dynamics Conf. St. Petersburg. 2008. P. 1–6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lib.physcon.ru/doc?id=feae0bcd4a23>.
- [Somov et al., 2008] *Somov Ye. I., Butyrin S. A., Somov S. Ye.* Guidance and robust gyromoment precise attitude control of agile observation spacecraft // Proc. 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul. 2008. P. 3422–3427. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/36298.html>.
- [Somov et al., 2011] *Somov S., Somov Ye., Butyrin S., Butko A.* Optimizing the guidance and control laws at the space optoelectronic observation // Proc. 18<sup>th</sup> IFAC World Congress. Milan. 2011. P. 2078–2083. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/48161.html>.

**ALGORITHMS FOR GUIDANCE AND GYROMOMENT ATTITUDE  
CONTROL OF THE LAND-SURVEY SATELLITES AT A SCANNING  
OPTOELECTRONIC OBSERVATION**

**Ye. I. Somov, S. A. Butyrin**

*Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability,  
Samara State Technical University*

The spacecraft (SC) guidance algorithms for a scanning optoelectronic observation of the Earth surface and for the SC rotational maneuvers, are presented. We describe algorithms for discrete filtering the measurements of a strapped-down inertial navigation system (SINS) and for the SC gyromoment control.

*Keywords:* space scanning observation, guidance, gyromoment control.

---

**Somov Yevgeny Ivanovich** — head of department for guidance, navigation and motion control, PhD, assistant professor, e-mail: e\_somov@mail.ru.

**Butyrin Sergey Anfimovich** — head of laboratory for modeling of control systems, PhD, assistant professor, e-mail: butyrinsa@mail.ru.



## **Секция 2**

# **СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НАЗЕМНЫХ, НАДВОДНЫХ И ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ**

## СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕРЕОЗРЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Е. А. Девятериков, Б. Б. Михайлов

Научно-учебный центр «Робототехника»

Московского Государственного технического университета им. Н. Э. Баумана  
(НУК РЦ МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва

Предлагается метод измерения координат мобильного робота с помощью технического стереозрения — метод визуальной одометрии, основанный на измерении смещения ключевых точек пространства, информация о которых получается из анализа последовательности изображений. Такая система работает в заранее неподготовленной, недетерминированной среде и нечувствительна к проскальзыванию колес. Приводятся алгоритм и структура системы визуальной одометрии, результаты исследований на виртуальной модели и прототипе системы, установленной на мобильном роботе.

*Ключевые слова:* стереозрение, техническое зрение, одометрия, измерение пути, мобильный робот.

### АЛГОРИТМ ВИЗУАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ

Идея алгоритма визуальной одометрии [Девятериков, Михайлов, 2012; Nist'er et al., 2005; Xu, Shen, 2006] — выделять на изображениях с двух камер точки определенного свойства, вычислять и наблюдать изменение их трехмерных координат и пересчитывать эти изменения в смещение и угол поворота робота (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм визуальной одометрии

Девятериков Егор Анатольевич — студент, e-mail: retegor@mail.ru.

Михайлов Борис Борисович — доцент, кандидат технических наук, e-mail: robot@bmstu.ru.



### ПОИСК ОСОБЫХ ТОЧЕК

Особая точка сцены — точка, изображение которой можно устойчиво отличать от изображений всех соседних с ней точек.

В методе Гарриса для окрестности точки находится матрица вторых производных от интенсивности, матрица Гессе  $H(p)$  и функция  $R$ , значение которой сравнивается с пороговым:

$$R = \det(H) - k(\text{trace}(H))^2, \quad k = 0,04\dots0,6, \quad H(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix}.$$

Метод ускоренной сегментальной проверки (Features from Accelerated Segment Test — FAST) — один из самых быстрых. В нем яркость точек, образующих окружность заданного радиуса, сравнивается с яркостью точки в центре этой окружности [Rosten, Drummond, 2005]. Если яркость, по крайней мере,  $N$  последовательных точек окружности отличается от яркости ее центра на заданное пороговое значение, то центр окружности считается особой точкой.

Ускоренный метод поиска особых точек (Speeded-Up Robust Features — SURF) [Bay et al., 2008], инвариантных к масштабированию, повороту и освещенности, относится к лидерам по надежности. Здесь используется Гауссово пространство. Критерий поиска  $T$  — определитель матрицы Гессе:

$$T = \det(H(x, \sigma)) = \begin{vmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{vmatrix},$$

$$L_{xx}(x, \sigma) = \frac{\partial g(x, y, t)}{\partial x \partial x} * I(x, y), \quad L_{xy}(x, \sigma) = \frac{\partial g(x, y, t)}{\partial x \partial y} * I(x, y), \dots,$$

где  $g(x, y, t)$  — функция Гаусса со стандартным отклонением  $t = \sigma^2$ .

### СЛЕЖЕНИЕ ЗА ЛОКАЛЬНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ МЕТОДОМ ЛЮКАСА И КЕНЕДА

Для вычисления пути робота находится смещение особых точек между текущим и предыдущим изображениями методом Люкаса и Кенеда [Bradski, Karhler, 2008]. Пусть  $F$  и  $G$  — функции интенсивности 1-го и 2-го изображений;  $x$  — особенность  $F$ ;  $x + h$  — такая особенность  $G$ , что разность окрестностей этих точек минимальна. Тогда смещение точки вычисляется по формуле:

$$h = \left[ \sum_x \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^T [G(x) - F(x)] \right] \left[ \sum_x \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^T \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right) \right]^{-1}.$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ТОЧЕК

Если оптические оси камер параллельны, то расстояние  $Z$  до точки

$$Z = \frac{fT}{x^l - x^r},$$

где  $T$  — расстояние между камерами;  $f$  — фокусное расстояние;  $x^l$  и  $x^r$  — координаты проекций точки на левом и правом изображениях.

### ФИЛЬТРАЦИЯ ОСОБЫХ ТОЧЕК

Пусть  $C_i = (X_i^C \ Y_i^C \ Z_i^C)^T$  и  $P_i = (X_i^P \ Y_i^P \ Z_i^P)^T$  координаты  $i$ -й особой точки относительно робота в текущий и некоторый предыдущий момент времени. Фильтрация особых точек основана на допущении, что их взаимное положение в пространстве не существенно изменяется за время смены кадров [Hirschmuller, 2002]:

$$\begin{cases} \delta D_{ik} = \|P_i - P_k\| - \|C_i - C_k\| < D_{\max}, \\ \cos \delta \theta_{ik} = \frac{(C_i - C_k)(P_i - P_k)}{\|C_i - C_k\| \|P_i - P_k\|} < \cos \theta_{\max}, \end{cases} \quad i, k = 1 \dots N',$$

где  $\delta D_{ik}$ ,  $\delta \theta_{ik}$  — изменение расстояния между двумя точками, и образованного ими угла поворота отрезка;  $D_{\max}$ ,  $\theta_{\max}$  — максимально допустимые  $\delta D_{ik}$ ,  $\delta \theta_{ik}$ ,  $N'$  — исходное количество найденных особых точек. Составляется таблица согласованности  $M_{N' \times N'}$ , элементы которой равны:

$$m_{ik} = (\delta D_{ik} < D_{\max}) \text{ и } (\delta \theta_{ik} < \theta_{\max}) = 0 \text{ (несогл.)}, 1 \text{ (согл.)}.$$

Выбирается точка с наибольшим количеством согласований. Затем среди точек, согласованных с ранее выбранными, снова находится точка с наибольшим количеством согласований и т. д. Таким образом, выбирается большая (не всегда наибольшая) группа из  $N$  самосогласованных точек.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА

Изменение положения системы координат робота будем описывать в виде аффинного преобразования [Vota, 2008]:

$$f: R^3 \rightarrow R^3, \quad f(x) = Rx + T,$$

где  $T = (\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z)^T$ ,  $R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$  — матрицы переноса и поворота.

Тогда верно соотношение:

$$C_i = RP_i + T.$$

Получаем три системы уравнений:

$$\begin{cases} X_i^C = r_{11}X_i^P + r_{12}Y_i^P + r_{13}Z_i^P + \Delta X, & i = \overline{1, N}, \\ Y_i^C = r_{21}X_i^P + r_{22}Y_i^P + r_{23}Z_i^P + \Delta Y, & i = \overline{1, N}, \\ Z_i^C = r_{31}X_i^P + r_{32}Y_i^P + r_{33}Z_i^P + \Delta Z, & i = \overline{1, N}, \end{cases}$$

где  $N$  — количество найденных особых точек.

Системы имеют вид:

$$x_i^C = r_1 X_i^P + r_2 Y_i^P + r_3 Z_i^P + \Delta, \quad i = \overline{1, N}$$

и решаются методом наименьших квадратов. Регрессионная модель:

$$f(r_1, r_2, r_3, \Delta, X_i^P, Y_i^P, Z_i^P, 1) = r_1 X_i^P + r_2 Y_i^P + r_3 Z_i^P + \Delta \cdot 1,$$

$\omega = (r_1, r_2, r_3, \Delta)^T$  — вектор неизвестных параметров,

$y = (x_1^C, x_2^C, \dots, x_N^C)^T$  — вектор фактических значений,

$$A = \begin{pmatrix} X_1^P & Y_1^P & Z_1^P & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N^P & Y_N^P & Z_N^P & 1 \end{pmatrix} \text{ — выборка значений аргументов.}$$

Вектор неизвестных параметров находится по формуле:

$$\omega = (A^T A)^{-1} (A^T y).$$

### 3D-МОДЕЛЬ ДЛЯ ОТЛАДКИ ПРОГРАММЫ

Для тестирования и отладки программы была создана трехмерная модель в среде SolidWorks (рис. 2), состоящая из двух виртуальных камер, стола и простых объектов. При перемещении камер по замкнутой траектории ошибка выхода в начальную точку составила 5 % от суммарного пройденного пути. Таким образом, была подтверждена работоспособность алгоритма.

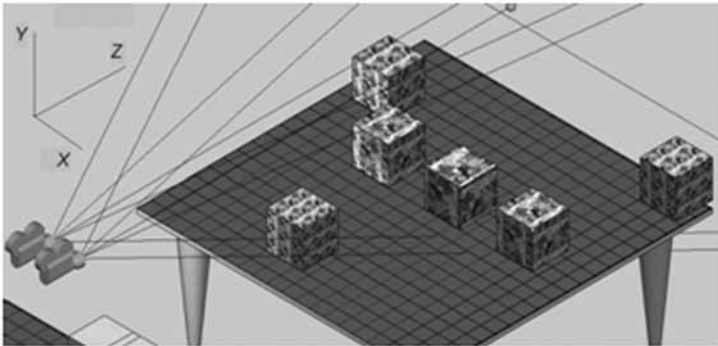


Рис. 2. Модель системы

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для экспериментальной проверки программы, реализующей алгоритм визуальной одометрии, был изготовлен макет робота, показанный на рис. 3.

Состав и структура системы показаны на рис. 4.

Камеры были закреплены параллельно полу и друг другу с базой 120 мм.

Для оценки точности системы и алгоритмов поиска особых точек был несколько раз обработан один и тот же набор изображений, полученных при многократном перемещении робота по замкнутой траектории: 1 м вперед-назад. Оценивалась средняя ошибка выхода в исходную точку (рис. 5).

Затем обрабатывались записи, полученные при цикличном повороте робота на 90° с угловой скоростью около 25 град/с. Анализировалась средняя ошибка выхода угла в начальное значение для каждой итерации (рис. 6).

В сводной таблице показаны скорость обработки и ошибки при использовании трех методов поиска особых точек.

Метод выделения особых точек	Скорость обработки, стереопар/с	Ошибка выхода в исходную точку, %	
		Путь	Угол
FAST	37,2	7,2	–
HARRIS	17,9	7,6	12,6
SURF	10,0	3,8	–



Рис. 3. Система визуальной одометрии на мобильном роботе

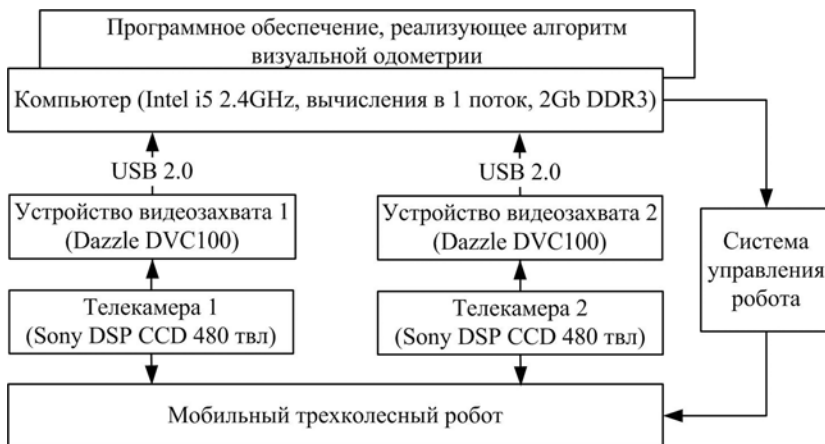


Рис. 4. Состав и структура системы визуальной одометрии

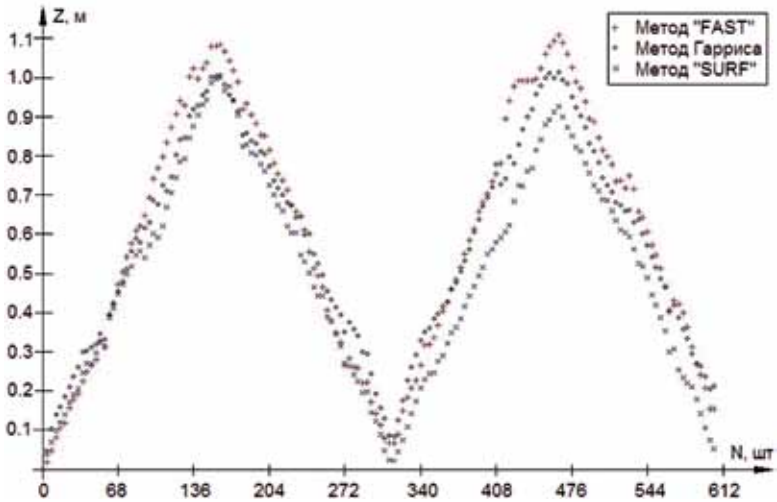


Рис. 5. График, полученный при перемещении робота по замкнутой траектории:  $Z$  — пройденный путь;  $N$  — число обработанных стереопар

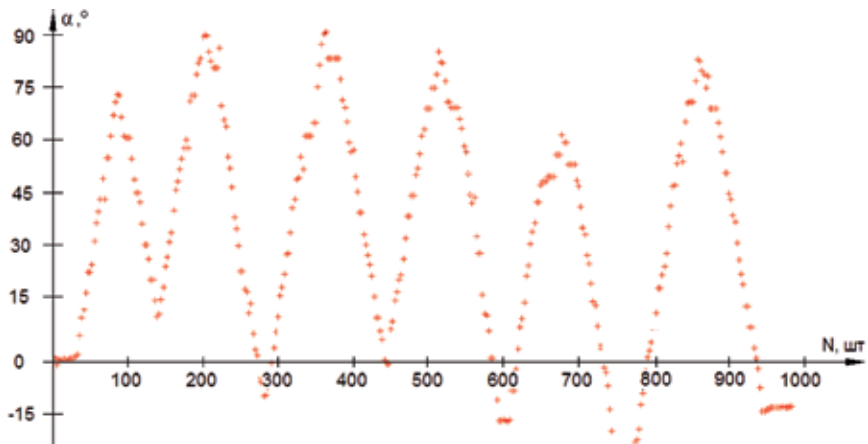


Рис. 6. Графики изменения вычисленного угла при повороте робота:  $\alpha$  — угол поворота робота;  $N$  — количество обработанных пар изображений

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента показывают, что метод визуальной одометрии позволяет достаточно точно измерить пройденный путь. При ошибке 3,8 %, лучшую точность при обработке 10 кадров/с обеспечивает метод SURF. В режиме реального времени может работать метод FAST, позволяющий обрабатывать 37 пар кадров в секунду и дающий ошибку 7,2 %. Система позволяет также измерить угол поворота робота со средней ошибкой 13 %. В ходе работы были решены следующие задачи: разработана структура системы и реализован алгоритм визуальной одометрии, создана трехмерная модель системы для проверки работоспособности алгоритма, система проверена на реальных изображениях, полученных при движении мобильного робота, определены ее точность и быстродействие.

ЛИТЕРАТУРА

- [Девятериков, Михайлов, 2012] *Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б.* Система технического зрения для измерения пути мобильного робота // Сб. тр. научно-тех. конф. «Техническое зрение в системах управления 2011». М.: ИКИ РАН, 2012. С. 219–224.
- [Bay et al., 2008] *Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool V.* Speeded-Up Robust Features // *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. V. 110. Iss. 3. P. 346–359.
- [Bota, 2008] *Bota S.* Camera motion estimation using monocular and stereo-vision // *Intelligent Computer Communication and Processing*. 2008. P. 275–278.
- [Bradski, Karhler, 2008] *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV. 2008.
- [Hirschmuller, 2002] *Hirschmuller H.* Fast, unconstrained Camera Motion Estimation from stereo without Tracking and Robust Statistics. 2002.
- [Nist'er et al., 2005] *Nist'er D., Naroditsky O., Bergen J.* Visual Odometry. 2005.
- [Rosten, Drummond, 2005] *Rosten E., Drummond T.* Fusing Points and Lines for High Performance Tracking // 10<sup>th</sup> IEEE Intern. Conf. Computer Vision (ICCV'05). 2005. V. 2. P. 1508–1515.
- [Xu, Shen, 2006] *Xu J., Shen M.* Robust stereo visual odometry for autonomous rover. 2006.

**COMPUTER STEREOVISION SYSTEM FOR MOBILE ROBOT  
COORDINATES MEASURING**

**E. A. Devyaterikov, B. B. Mikhailov**

*Bauman Moscow State Technical University Scientific-Educational Center “Robotic Engineering”*

The paper presents a mobile robot coordinates measuring method based on computer stereo-vision system — visual odometry based on calculating of surroundings keypoints flow. The keypoint data comes from image sequence processing. Such system capable of working in unprepared nondeterministic environment and wheels slipping insensitive. The paper consists of visual odometry algorithm and system description, results of it's testing with virtual model and with prototype set on mobile robot.

*Keywords:* stereovision, computer vision, odometry, trajectory recovering, mobile robot.

---

**Authors:** **Devyaterikov Egor** Anatolievich — student, e-mail: retegor@mail.ru.  
**Mikhailov Boris Borisovich** — docent, PhD, e-mail: robot@bmstu.ru.

## ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**В. П. Алешин, Д. Д. Новгородцев, Е. А. Гришин,  
В. Д. Шаргородский**

*Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация  
«Системы прецизионного приборостроения» (ОАО «НПК «СПП»), Москва*

Рассматривается интерактивная система определения ориентации и параметров движения КА относительно центра масс. Особенно актуальны данные задачи в аварийных ситуациях. Для их решения эффективно использование в качестве сенсоров телескопов, оснащенных адаптивной оптической системой [Aleshin et al., 2009]. Наблюдения проводятся на дальностях в сотни и тысячи километров через турбулентную атмосферу на квантовом пороге чувствительности и дифракционном пределе разрешения. Результаты наблюдений использовались в работе Государственных комиссий по анализу аварий космических аппаратов (КА) «Коронас-Фотон» и «Фобос-Грунт».

*Ключевые слова:* адаптивная оптика, космический аппарат, аварийная ситуация, ориентация КА, системы технического зрения.

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы компьютерного зрения, предлагаемые для использования в подобных задачах [Voorhees et al., 2008], предполагают высокое качество входных изображений (фотографическое) и применяются до дальностей в несколько десятков километров. Экспериментальные исследования визуального 3d-восприятия человеком динамических виртуальных сцен показывают высокие возможности мозга в интерпретации сильно искаженных изображений [Aleshin et al., 2011]. Проведенные в последнее время разработки, позволили создать эффективные интерактивные алгоритмы, основанные на использовании прогноза заатмосферных изображений [Новгородцев и др., 2011] и сравнения их с реальными наблюдениями [Алешин и др., 2011а, б].

Особую сложность представляет анализ аварий некооперируемых (прекративших передачу телеметрии) объектов. Единственными возможными источниками информации в этом случае будут наземные средства наблюдения.

Напомним аварийную ситуацию с орбитальной станцией «Салют-7». Анализ её движения относительно центра масс (ЦМ) на основе радиолокационных наблюдений позволил подготовить и выполнить операцию по восстановлению работоспособности и продлению жизнедеятельности.

Наиболее сложным считается случай медленного движения космического аппарата относительно ЦМ, когда оценка текущей ориентации КА в пространстве

---

**Алешин Владимир Петрович** — начальник сектора, кандидат технических наук, e-mail: aleshin\_vl@mail.ru.

**Новгородцев Дмитрий Дмитриевич** — начальник группы, e-mail: novgorodtsev-dmitry@yandex.ru.

**Гришин Евгений Алексеевич** — заместитель генерального конструктора, главный конструктор Алтайского оптико-лазерного центра (АОЛЦ), кандидат технических наук, e-mail: grishin@niipr-moskva.ru.

**Шаргородский Виктор Данилович** — генеральный конструктор, доктор технических наук, профессор, e-mail: niipr@niipr-moskva.ru.

представляется проблематичной. Достаточно эффективную информацию при этом дают наблюдения с помощью адаптивной оптики. В статье анализируются наблюдения, которые проводятся через турбулентную атмосферу с помощью адаптивной оптической системы (АОС), установленной на телескопе ТТИ диаметром 60 см Алтайского оптико-лазерного центра (дифракционный предел разрешения  $\sim 0,3$  угл. с) (рис. 1). Точка стояния телескопа: долгота —  $82,2^\circ$ , широта —  $51,3^\circ$ , высота — 368 м. Параметры АОС: число субапертур — 30, постоянная времени адаптации —  $\sim 1$  мс.

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

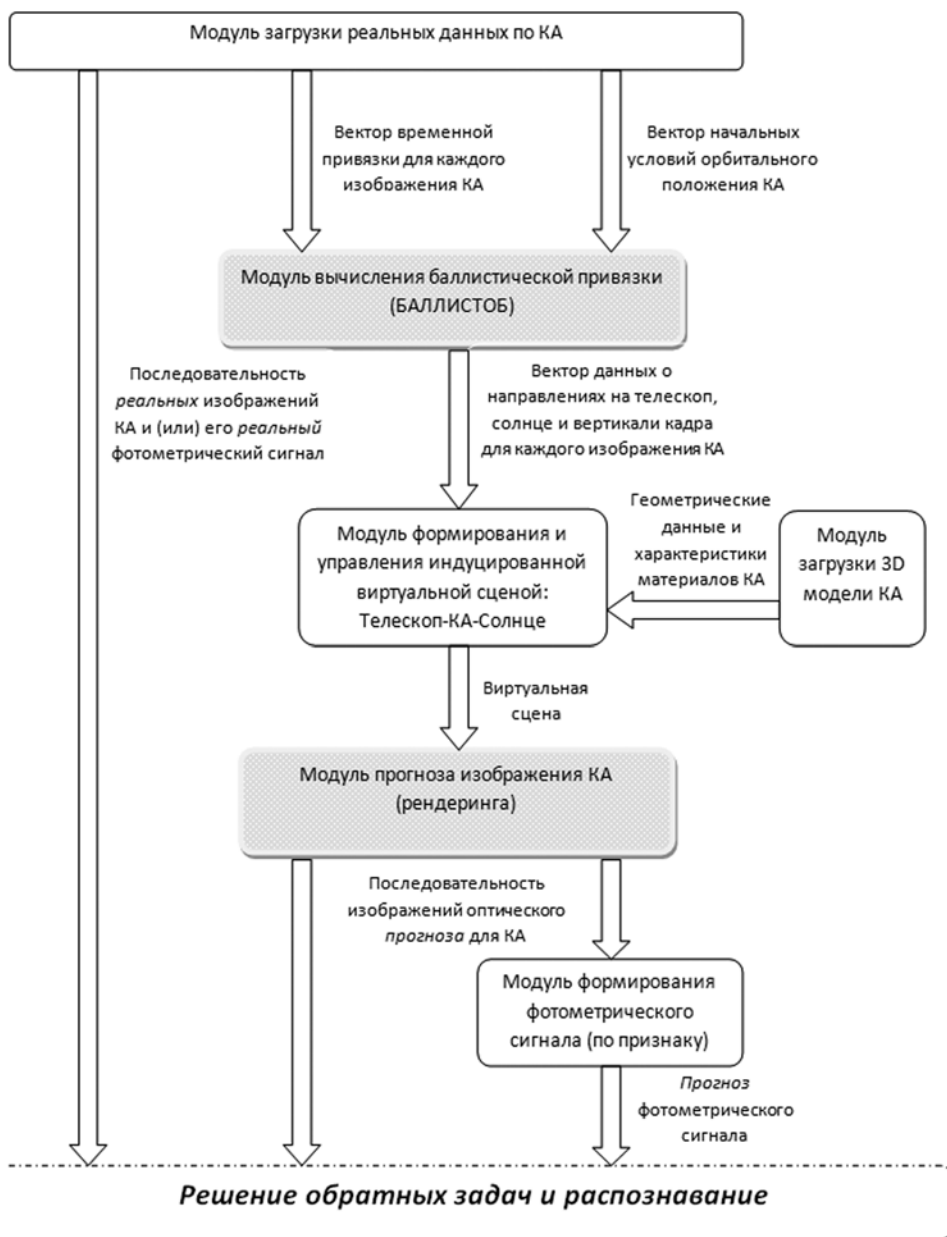
На рис. 2 приводится схема использования методов индуцированного виртуального окружения (среды) [Алешин и др., 2007] и прогноза заатмосферных изображений в этой задаче [Алешин и др., 2011б]. Прогноз заатмосферных изображений и фотометрического сигнала распадается на две подзадачи: прогноз орбитального движения и вычисление векторов ориентации КА, орта линии визирования, вектора ориентации кадра и орта направления на Солнце; построение заатмосферных изображений (физически адекватный рендеринг) с учетом баллистической привязки [Новгородцев и др., 2011]

На основе технологии индуцированной виртуальной среды создан комплекс интерактивных программ, позволяющий проводить определение ориентации КА и интерпретацию последовательности изображений АОС в диалоговом режиме. В отличие от традиционных систем технического зрения, применяемых в мобильных устройствах, здесь на первое место выходит не оперативность и автономность, а надежность и наглядность процесса интерпретации получаемой информации. Это особенно важно в условиях высокой ответственности за принимаемые решения и при необходимости демонстрации результатов оппонировавшей стороне.



Рис. 1. Телескоп с адаптивной оптической системой Алтайского оптико-лазерного центра





**Рис. 2.** Структурная схема программ мониторинга состояния КА с помощью технологии индуцированной виртуальной среды

Процесс определения ориентации вкратце сводится к следующему. После загрузки входной информации осуществляется выбор системы стабилизации, в которой производится поиск ориентации (распространенная система — орбитальная). Далее выбирается один из наиболее информативных кадров видеопоследовательности, для которого путем вращения 3d-модели КА подбирается его ориентация. Для оценки ориентации моделируется вся последовательность

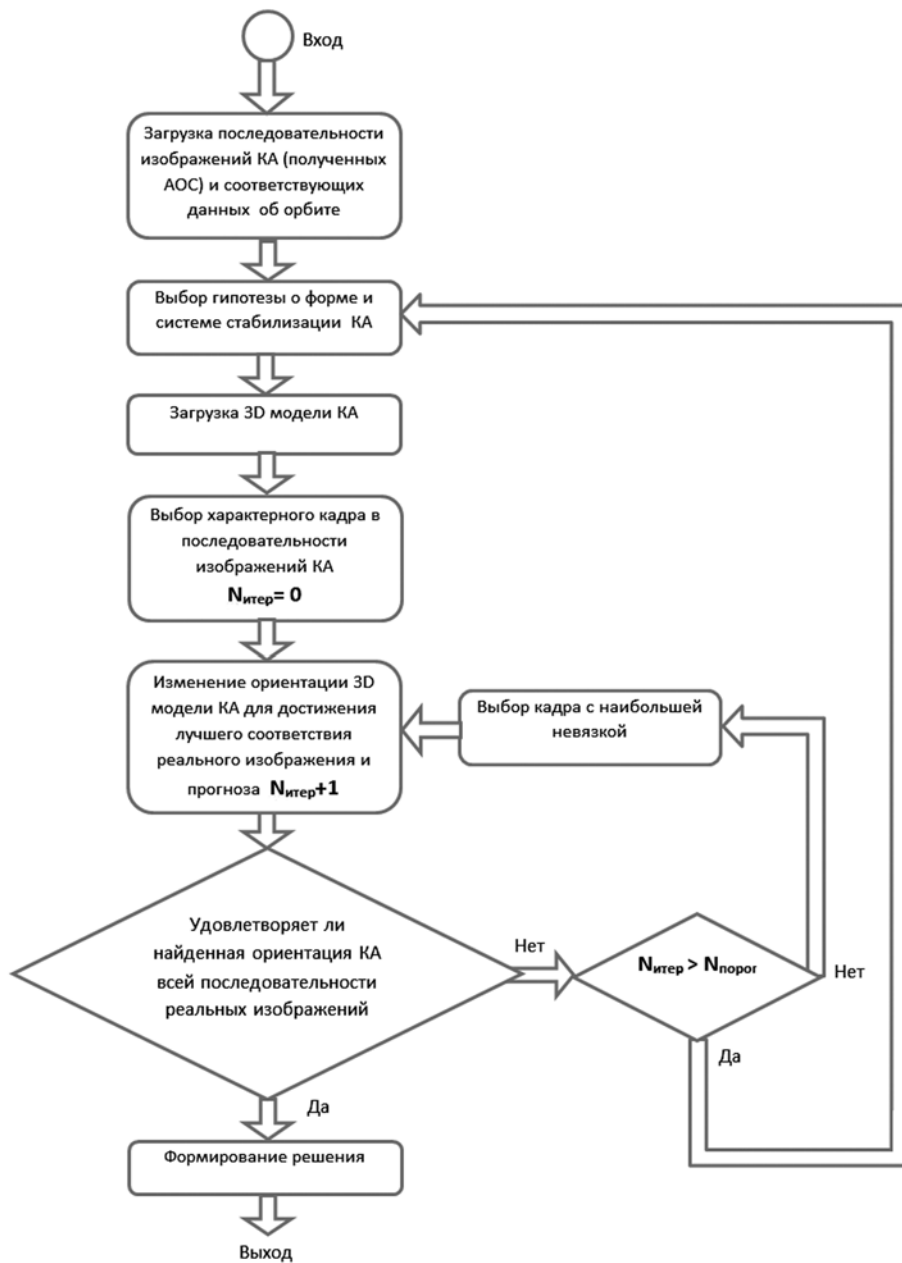


Рис. 3. Схема интерактивного поиска ориентации КА

кадров, соответствующая реальной орбите аппарата (в течение проводки система стабилизации вращается относительно телескопа). Оценивается степень совпадения прогнозируемой видеопоследовательности (смоделированной) и реальной. Если соответствие не найдено, то выбирается кадр с наибольшей невязкой и выполняется подбор ориентации. Далее процесс повторяется по схеме интерактивного поиска (рис. 3).



Рис. 4. Синхронное отображение видеопоследовательности АОС и последовательности прогнозируемых изображений (показана их часть) для наиболее вероятной ориентации (проводка от 16.06.2010 г.)

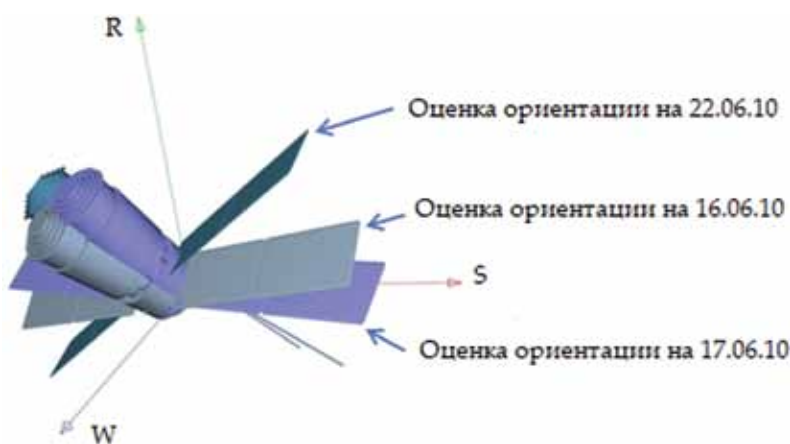


Рис. 5. Ориентация КА «Коронас-Фотон» по дням проводок (16, 17 и 22.06.2010 г.)

### АНАЛИЗ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ «КОРОНОС-ФОТОН»

Космический аппарат был предназначен для солнечных исследований. Ориентация в рабочем состоянии определялась по Солнцу — на него были ориентированы измерительные приборы, панели солнечной батареи ортогональны вектору КА — Солнце. Орбита — солнечно-синхронная. Аппарат перешел в аварийное состояние в декабре 2009 г. Обработка проводок за 16 (рис. 4), 17 и 22.06.2010 г., позволила определить ориентацию аппарата и степень отклонения солнечных батарей от направления на Солнце.

Анализ проводился в орбитальной системе координат (орты  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{W}$ ), где  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор из центра Земли;  $\mathbf{S}$  — касательная к орбите в сторону направления вектора скорости;  $\mathbf{W}$  — орт (бинормаль), дополняющий  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{S}$  до правой тройки.

В процессе анализа и обработки всех последовательностей изображений АОС с использованием заатмосферного прогноза были определены показанные на рис. 5 три ориентации КА по дням проводок.

**АНАЛИЗ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ  
«ФОБОС-ГРУНТ» ЗА ПЕРИОД С 29 НОЯБРЯ ПО 25 ДЕКАБРЯ 2011 г.**

Приведем результаты наблюдений КА «Фобос-Грунт» и их интерактивную интерпретацию за период с 29 ноября по 25 декабря 2011 г. Всего было получено шесть проводок приемлемого качества. Параметры проводок и полученная ориентация аппарата даны в таблице.

ДМВ начала проводки	Число кадров	Минимальная дальность, км	Максимальный угол места, град	Атмосфера	Положение Солнца	Ориентация, град
29.11.2011 14:45:26,500	1167	235	74	Средняя	R: -0,636 S: -0,697 W: 0,329	$\varphi_r$ : 121 $\varphi_s$ : -12 $\varphi_w$ : 251
01.12.2011 14:33:48,046	1578	227	84	Плохая	R: -0,610 S: -0,764 W: 0,206	$\varphi_r$ : 107 $\varphi_s$ : -173 $\varphi_w$ : 77
23.12.2011 04:29:17,968	1261	276	70	Средняя	R: 0,202 S: 0,263 W: -0,943	$\varphi_r$ : 164 $\varphi_s$ : 13 $\varphi_w$ : 44
24.12.2011 04:13:43,859	2634	265	77	Хорошая	R: 0,174 S: 0,354 W: -0,918	$\varphi_r$ : 99 $\varphi_s$ : 21 $\varphi_w$ : 28
25.12.2011 03:58:08,484	1199	259	82	Средняя	R: 0,146 S: 0,441 W: -0,885	$\varphi_r$ : 45 $\varphi_s$ : 31 $\varphi_w$ : -303
25.12.2011 05:29:16,828	1791	256	78	Хорошая	R: 0,252 S: 0,396 W: -0,882	$\varphi_r$ : -116 $\varphi_s$ : 39 $\varphi_w$ : 238

Ориентация аппарата в орбитальной системе координат задается матрицей поворота  $M$  следующим образом

$$M = \begin{pmatrix} \cos \varphi_w & \sin \varphi_w & 0 \\ -\sin \varphi_w & \cos \varphi_w & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_s & 0 & \sin \varphi_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_s & 0 & \cos \varphi_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_r & \sin \varphi_r \\ 0 & -\sin \varphi_r & \cos \varphi_r \end{pmatrix},$$

где  $\varphi_r, \varphi_s, \varphi_w$  — углы последовательных поворотов исходной 3d-модели КА относительно осей  $R, S, W$  соответственно.

Далее приведены примеры (рис. 6 и 7) прогнозируемых заатмосферных изображений КА, индуцированные с помощью 3D-моделирования аппарата, учета реальной орбиты, условий освещенности и подвески телескопа, которые отображены на левой части рисунков. На правой части помещены соответствующие кадры с изображениями КА, полученные с помощью АОС. Правые и левые части рисунков синхронизированы по времени.

Среди проводок, приведенных в таблице, отметим проводку от 24 декабря, которая проводилась в наиболее благоприятных атмосферных условиях (см. рис. 6). Эта проводка большой длительности демонстрирует освещенность Солнцем тыльной поверхности солнечных панелей. Проводки, не выделенные в таблице, осуществлялись в условиях сильно возмущенной атмосферы (большое атмосферное рассеяние и соответственно малое значение параметра Фрида — меньшее размера субапертуры адаптации). Однако и по этим проводкам удалось провести оценку ориентации. Во всех проводках не обнаружено ориентации активной поверхности солнечных панелей на Солнце.

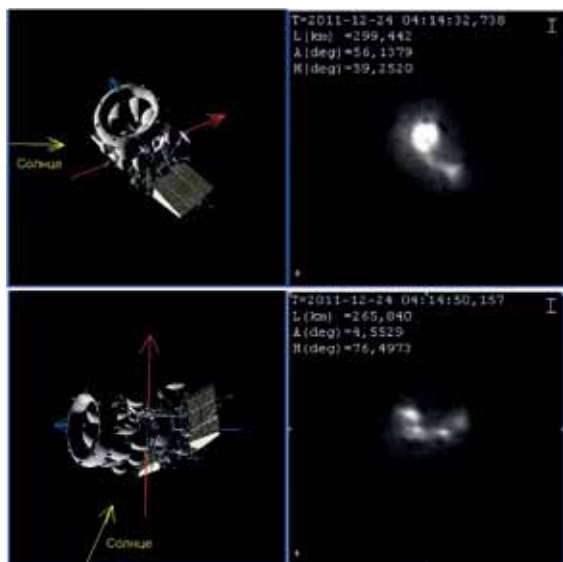


Рис. 6. Результаты обработки проводки от 24 декабря 2011 г.

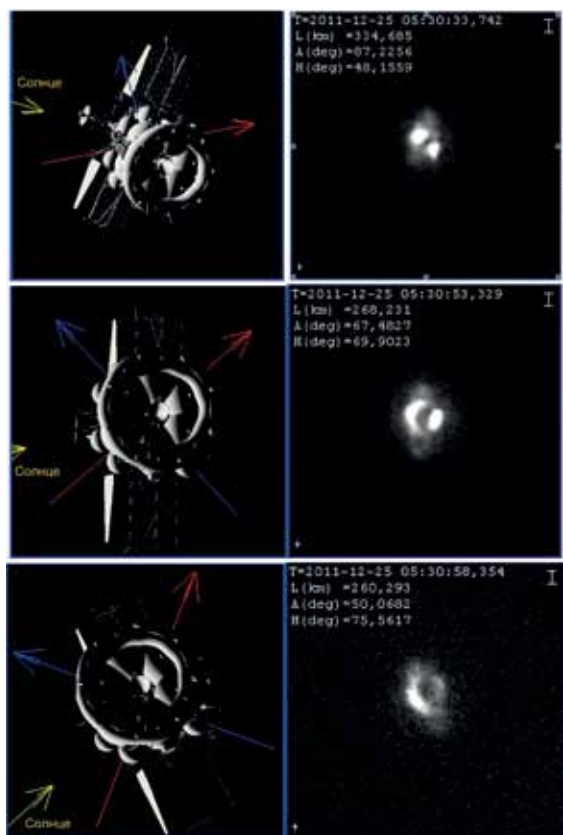


Рис. 7. Результаты обработки проводки от 25 декабря 2011 г.

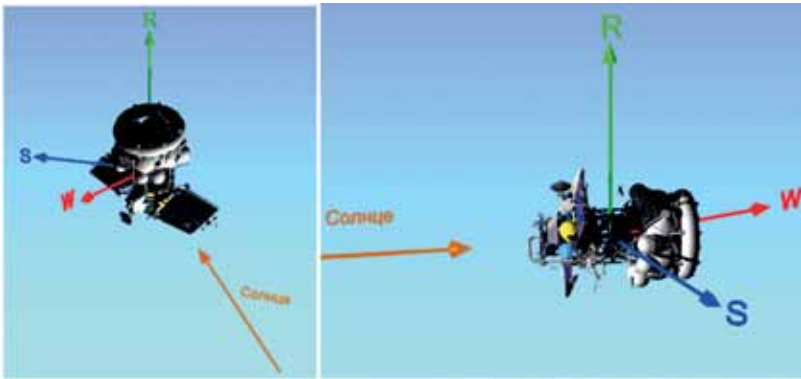


Рис. 8. Ориентация КА «Фобос-Грунт» 29.11 (слева) и 23.12.2011 г. (справа)

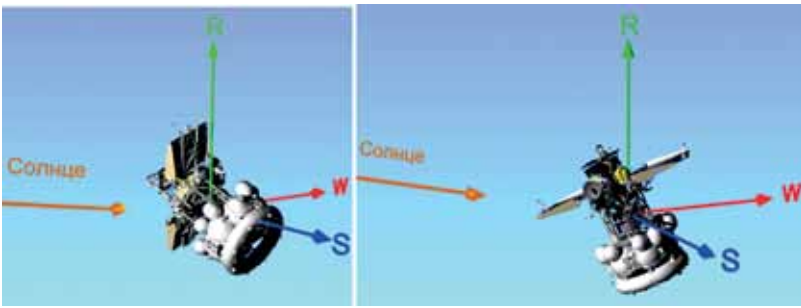


Рис. 9. Ориентация КА «Фобос-Грунт» 24.12 (слева) и 25.12.2011 г. (справа)

На рис. 8 приведены оценки ориентации КА «Фобос-Грунт» в проводках 29 ноября и 23 декабря 2011 г. Соответствующие результаты по проводкам 24 декабря и 25 декабря 2011 г. проиллюстрированы рис. 9.

## ВЫВОДЫ

Методы индуцированной виртуальной среды (3D моделирования) решают в значительной степени проблему некорректной постановки соответствующей обратной задачи. Использование адаптивной оптики совместно с прогнозом заатмосферных изображений ИСЗ позволяет проводить анализ аварийных ситуаций и оценку ориентации в самых сложных ситуациях медленного нестабилизированного движения космического аппарата относительно ЦМ. Разработанная интеллектуальная система технического зрения для мониторинга состояния КА показала высокую эффективность при анализе конкретных аварийных ситуаций.

## ЛИТЕРАТУРА

[Алешин и др., 2007] Алешин В. П., Афанасьев О. В., Клименко С. В., Лавров В. В., Новгородцев Д. Д., Рындин Ю. Г. Методы компьютерной графики и индуцированного виртуального окружения в задачах обработки некоординатной информации // Вопросы радиоэлектроники. 2007. № 4. С. 52–72.

- [Алешин и др., 2011a] Алешин В. П., Гришин Е. А., Иншин П. П., Новгородцев Д. Д., Шаргородский В. Д. Оценка аварийных ситуаций на космических аппаратах по изображениям адаптивной оптики Алтайского оптико-лазерного центра // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. С. 30–35.
- [Алешин и др., 2011б] Алешин В. П., Новгородцев Д. Д., Выгон В. Г., Гришин Е. А., Шаргородский В. Д. Мониторинг аварийных ситуаций искусственных спутников Земли на основе измерений и прогноза изображений адаптивной оптики и фотометрических сигналов // Вестн. СибГАУ. 2011. Вып. 6. № 39. С. 159–165.
- [Новгородцев и др., 2011] Новгородцев Д. Д., Алешин В. П., Гришин Е. А., Юрасов В. С. Методы и программы прогноза оптических изображений и фотометрических сигналов космических аппаратов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. С. 18–29.
- [Aleshin et al., 2009] Aleshin V., Klimenko S., Novgorodcev D. Space objects localization and recognition using an adaptive optical observation system // Proc. 19 Intern. Conf. GraphiCon-2009. Moscow, Russia. 2009. P. 311–313.
- [Aleshin et al., 2011] Aleshin V., Afanasiev V., Bobkov A., Klimenko S., Kuliev V., Novgorodtsev D. Visual 3D perception of motion environment and visibility factors in virtual space // Proc. Intern. Conf. Cyberworlds-2011. Banff, Canada. 2011. P. 222–228.
- [Voorhees et al., 2008] Voorhees H., Radke R., Poelman C. Automatic Reconstruction of Spacecraft 3D Shape from Imagery: Abstr. Technical Papers // Amos Conference. 2008. P. 18.

## INTERACTIVE SYSTEM OF TECHNICAL VISION FOR SPACECRAFT MONITORING

V. P. Aleshin, D. D. Novgorodtsev, E. A. Grishin, V. D. Shargorodsky

*Open Joint-stock Company “Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments” (OJC “RPC” PSI”), Moscow*

The article considers an interactive system to determine the orientation and motion parameters of spacecraft relative to its center of mass. Given problems are especially actual in emergency situations. Using as a sensor the telescopes equipped with an adaptive optics (AOS) is quite effective for their solution [Aleshin et al., 2009]. Observations are performing at a range of hundreds and thousands of kilometers through the turbulent atmosphere and near the quantum threshold of sensitivity and the diffraction limit of resolution. Results of the observation sessions carried out by AOS were used in the working process of the Russian State Committees for analyzing the spacecraft Koronas-Photon and the spacecraft Phobos-Grunt emergencies.

*Keywords:* space debris, adaptive optics, spacecraft, emergencies, spacecraft orientation, technical vision system.

---

**Aleshin Vladimir Petrovich** — Head of the Division, Candidate of Technical Science, e-mail: aleshin\_vl@mail.ru.

**Novgorodtsev Dmitry Dmitrievich** — Head of the Workgroup, e-mail: novgorodtsev-dmitry@yandex.ru.

**Grishin Evgeny Alekseevich** — Deputy Chief Designer, Chief Designer of Altay Optical Laser Center, Candidate of Technical Sciences, e-mail: grishin@niipp-moskva.ru.

**Shargorodsky Victor Daniilovich** — Chief Designer, Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: niipp@niipp-moskva.ru.

## ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К ПОСТРОЕНИЮ УПРАВЛЯЕМЫХ МНОГОКАМЕРНЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

В. П. Андреев, В. Е. Пряничников

*Международная лаборатория «Сенсорика» (МЛ «Сенсорика»), Москва,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Москва*

Предложен комплексный подход к построению информационно-измерительных систем технического зрения (СТЗ) и определен их функциональный состав — основы концепции построения управляемой многокамерной СТЗ. Предложена схема, отображающая двухконтурную структуру движения информационных потоков в распределенной информационно-измерительной и управляющей системе мобильных роботов (ИИУС МР) с супервизорным управлением. СТЗ МР рассматривается как локальная вычислительная сеть (ЛВС) с мобильными узлами.

*Ключевые слова:* система технического зрения, информационно-измерительная и управляющая система, локальная вычислительная сеть, супервизорное управление.

### АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Мобильный робот, как и любая сложная ИИУС, включает в себя подсистемы, реализующие функции оценки состояний внешней среды и самой управляющей системы, выработки сигналов обратной связи и управления (рис. 1). Для оценки состояний внешней среды и системы управления используется совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающих сбор, хранение и обработку всех поступающих данных. Эта **информационно-измерительная система** позиционируется как часть **бортовой ИИУС** и включает в себя различные **дистанционные сенсоры**: ультразвуковые датчики, телевизионные камеры, тепловизоры, сканирующие устройства (например, гамма-локаторы) и т. д.

В системах супервизорного управления окончательный анализ данных и формирование цели управления выполняет человек. Поэтому информацию об окружающей среде ему необходимо предоставлять в привычном для него виде, т. е. в виде растрового изображения. Тогда в качестве основного дистанционного сенсора следует использовать телевизионную камеру (или несколько ТВ-камер). В видимом диапазоне это стандартные матричные телекамеры, в ИК-диапазоне — тепловизоры. *Наличие человека в ИИУС мобильного робота с супервизорным управлением делает СТЗ основным поставщиком информации.*

Сигналы от датчиков подвержены воздействию различных шумов и искажений: флуктуационные шумы, искажения, вызванные не идеальностью характеристик самих датчиков, оптические искажения и т. п. Поэтому в системе должен

---

**Андреев Виктор Павлович** — заместитель директора по научным вопросам МЛ «Сенсорика», старший научный сотрудник, доктор технических наук, e-mail: andreevvipa@yandex.ru.

**Пряничников Валентин Евгеньевич** — ведущий научный сотрудник ИПМ РАН, доктор технических наук, заведующий кафедрой МГТУ «Станкин», профессор МГУПИ, e-mail: val-rover@rambler.ru.



присутствовать модуль **предобработки сигналов**, в задачу которого входит фильтрация этих шумов и коррекция искажений, а также преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму. Отличительная особенность мобильных роботов заключается в динамическом характере поступающей информации; следовательно, данный модуль должен выполнять свою функцию в масштабе реального времени. С таким огромным потоком информации обычный компьютер не справится, поэтому обработка сигналов должна выполняться с помощью специализированных процессоров.

Видеосигналы от телекамер и сигналы от иных дистанционных сенсоров должны быть преобразованы в *шлейф структурированных данных*, который необходимо подготовить для передачи по каналам связи (**коммуникационная среда**). *Под шлейфом данных будем понимать их структурированный непрерывный поток от всех бортовых сенсоров МР и команды управления, которые выстраиваются в некоторую последовательность по определенным правилам.*

Для передачи данных по внутренним коммуникационным каналам МР могут использоваться проводные широкополосные цифровые каналы (например, общая шина). Тогда «очищенные» от различного вида шумов цифровые изображения и иные данные попадают непосредственно в память блока анализа внутреннего интерфейса.

В задачу **внутреннего интерфейса** входит приведение данных к стандартному виду, их анализ, формирование частной цели управления и соответствующих команд (или программы) управления с передачей в модуль формирования команд управления МР для исполнения. Тем самым образуется внутренний контур управления.



Рис. 1. ИИУС мобильного робота

Наиболее эффективные алгоритмы преобработки сигналов — это адаптивные алгоритмы, использующие результат анализа информации о постоянно меняющейся внешней среде для настройки своих параметров. Команды на изменение параметров преобработки поступают от внутреннего интерфейса через модуль формирования команд управления, образуя контур обратной связи **А**.

В задачу модуля **формирования команд управления** входит преобразование решений, полученных в результате работы внутреннего интерфейса, в систему команд, определяемых спецификой модуля формирования сигналов управления. Это может быть, например, преобразователь USB в RS-232 или в RS-485. Фактически, модуль формирования команд управления — это преобразователь интерфейсов.

Модуль **формирования сигналов управления** преобразует команды управления в электрические сигналы, которые через соответствующие усилители подаются на исполнительные механизмы. Обычно это микропроцессор со своей системой микрокоманд и электронные (или электромеханические) ключи для включения и выключения приводов исполнительных механизмов (электродвигатели колес, манипуляторов и т. п.). Контур обратной связи **В** служит для управления исполнительными механизмами дистанционных сенсоров бортовой ИИУС.

При использовании в качестве коммуникационной среды аналоговых радиоканалов возникает проблема полосы пропускания, которая в этом случае должна быть достаточной для передачи стандартных телевизионных видеосигналов от множества телекамер, что очень сложно и дорого обеспечить. Кроме того, известна низкая помехоустойчивость аналоговых радиоканалов. Переход на передачу данных по цифровым радиоканалам позволяет решить эти проблемы.

Анализ данных и формирование цели управления, в зависимости от сложности решаемых задач, может выполняться с помощью как удаленного, так и внутреннего интерфейса. Поскольку *организовать радиоканал со 100%-й надежностью практически невозможно*, на внутренний интерфейс возлагается выполнение некоторого набора навигационных задач в автономном режиме: например, возврат в зону устойчивого радиоприема в случае потери радиуправляемости.

В задачу **удаленного интерфейса** входит приведение поступающих по радиоканалу данных к стандартному виду, их анализ, формирование цели управления и соответствующих команд или программы управления с передачей на борт МР для исполнения. Тем самым формируется внешний контур управления.

В зависимости от вида управления (дистанционное или супервизорное) анализ поступающих данных и формирование цели управления выполняет человек-оператор или автомат (внутренний интерфейс) плюс человек-оператор. В обоих случаях поступающая информация должна быть отображена на мониторах пульта управления в виде, наиболее удобном для восприятия человеком и с учетом динамического характера этой информации.

Для СТЗ все поступающие видеопотоки должны быть преобразованы в растровые изображения на экранах мониторов. Также на экранах мониторов должны формироваться мнемонические изображения, отражающие показания иных сенсоров, установленных на МР. Это могут быть показания ультразвуковых сенсоров, одометров, данных о состоянии системы энергообеспечения МР и текущем состоянии радиоканала и т. п.

Так как конечное решение о цели управления вырабатывает человек-оператор, пульт управления (ПУ), входящий в состав удаленного интерфейса, должен содержать элементы управления (кнопки, тумблеры, джойстики и т. п.),

соответствующие требованиям эргономики. Команды от элементов управления преобразуются в сигналы управления, которые передаются на борт МР по радиоканалу.

Реализация перечисленных функций возлагается на вычислитель ПУ. Требования к его производительности определяются, в первую очередь, количеством видеопотоков, которые надо декодировать и преобразовать в растровые изображения, отображаемые со стандартной кадровой частотой (25 кадров/с для PAL или 30 кадров/с для NTFS). В случае супервизорного управления на этот вычислитель возлагается также функция анализа данных и формирование цели управления в рамках команд, поступающих от человека-оператора.

### ФУНКЦИИ И КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Анализ информационных потоков в системе МР позволяет определить необходимый функциональный состав его оборудования. На рис. 2 приведен схематический вариант построения СТЗ для МР с супервизорным управлением. Этот вариант полностью согласуется с двухконтурной структурой движения информационных потоков (см. рис. 1).

Для обеспечения полноты данных об окружающем пространстве на МР устанавливается несколько датчиков видеосигнала: телекамеры, тепловизоры, сканеры и т. п. Набор видеосигналов необходимо передавать по беспроводным системам на ПУ, чтобы затем отобразить их на экранах мониторов в виде растровых

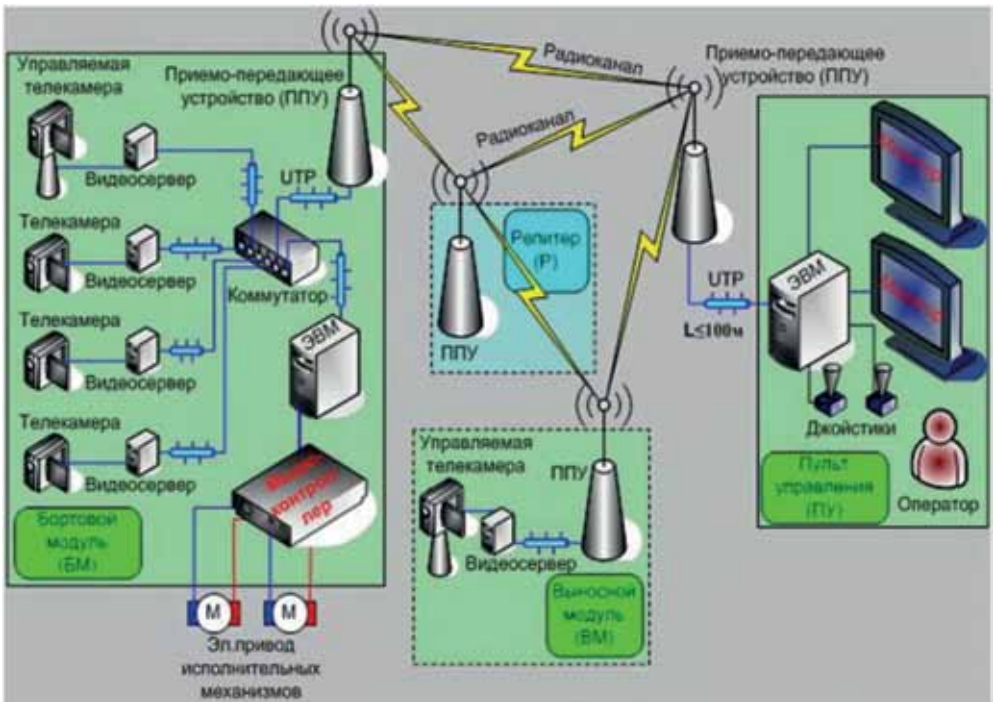


Рис. 2. Функциональные элементы СТЗ для МР с дистанционным и супервизорным управлением

изображений. Анализ получаемых изображений выполняется оператором МР, который, в свою очередь, управляет по радиоканалу исполнительными механизмами этого комплекса, в случае системы с дистанционным управлением, или формирует задачу, которая с помощью системы удаленный – внутренний интерфейс преобразуется в набор команд (программу), в случае супервизорного управления.

Перечисленные функции СТЗ подразумевают наличие следующих компонент:

- система датчиков оптического излучения с соответствующей оптикой и электронной системой формирования видеосигнала;
- система сбора видеоданных и фильтрации видеосигнала для коррекции искажений и преобразования изображения в иную форму представления (например, спецпроцессор для предобработки видеосигнала и/или видеосервер для преобразования аналогового видеосигнала в цифровую форму, его сжатия и приведения к стандарту Ethernet и т. п.);
- система формирования радиоканала (приемо-передающее устройство — ППУ) для связи между бортовым модулем (БМ) и ПУ;
- репитер (повторитель) предназначен в основном для получения устойчивого радиоканала на больших расстояниях и разрешения проблемы прямой радиовидимости;
- пульт управления, включающий системы формирования радиоканала (ППУ) и декодирования шлейфа данных, интерфейс оператора, системы преобразования видеосигнала в растровое изображение и управления отображением видеоинформации — это может быть специализированный вычислитель или стандартный ПК;
- системы автономного питания электронных блоков и приводов исполнительных механизмов мобильных модулей;
- вычислительное устройство БМ мобильного робота с супервизорным управлением, выполняющее анализ данных и формирование цели управления (внутренний интерфейс);
- выносные модули (ВМ) с установленными на них управляемыми телекамерами; ВМ (или «спутники») размещаются в непосредственной близости от места работы МР и позволяют оператору со стороны наблюдать за работой его исполнительных механизмов. Эти устройства должны быть автономны и могут размещаться на роботе-наблюдателе.

### СТЗ КАК ЛОКАЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ С МОБИЛЬНЫМИ УЗЛАМИ

При использовании СТЗ с несколькими телекамерами возникает проблема передачи по радиоканалу многопоточкового видео, поскольку даже для одной телекамеры при аналого-цифровом преобразовании видеосигнала цифровой поток может составить до 165 Мбит/с. Решение проблемы в объединении всех компонент СТЗ в ЛВС с мобильными узлами, в качестве которых выступают цифровые телекамеры, устанавливаемые на БМ и ВМ, репитер и бортовой вычислитель с одной стороны и вычислитель на пульте оператора с другой [Андреев и др., 2009]. Такая СТЗ обладает свойствами:

- **реконфигурируемость** — возможностью легко наращивать или изменять любые ресурсы СТЗ;

- **распределенности** — возможностью распределять вычислительные ресурсы между модулями;
- **многопользовательского режима** — возможностью получать изображения с телекамер и иную информацию одновременно на нескольких пультах оператора, в том числе подключенным к системе через Интернет, и управляемостью одновременно с разных ПУ;
- **управления через Интернет** — возможностью анализировать работу МР и управлять его исполнительными механизмами на любых расстояниях через подключение к СТЗ через Интернет;
- **возможностью цифровой обработки сигналов** — использования спецпроцессоров и универсальных ЭВМ, что позволяет чисто алгоритмически совершенствовать используемые алгоритмы обработки изображений и программы управления;
- **высоким качеством изображений** — возможностью использования телекамер высокого разрешения с хорошим качеством цветопередачи;
- **функциональностью** — по цифровому каналу можно передавать не только видеосигнал, но и звук, сигналы управления как СТЗ (например, поворотными-наклонными платформами), так и исполнительными механизмами МР;
- **многопоточностью видео** — возможностью передавать видеосигналы одновременно с нескольких телекамер без снижения качества изображений, что достигается за счет использования высокоэффективных алгоритмов сжатия последовательности кадров;
- **возможностью объединения модулей СТЗ в ЛВС через радиоканал** с использованием цифрового радиоканала стандарта Wi-Fi или Wi-Max и т. п.;
- **высокой помехозащищенностью** — в отличие от аналоговых систем цифровые каналы передачи данных обладают большей помехоустойчивостью;
- **защищенностью** — использованием методов защиты от несанкционированного доступа (например, VPN-каналы и/или шифрование и т. п.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный подход был использован для создания управляемой многокамерной СТЗ для робототехнических комплексов (РТК) BROKK-110D и BROKK-330 производства фирмы Holmhed Systems AG (Швеция), а также для учебно-научных МР с супервизорным управлением серии «АМУР» и экспериментального робота «Марсоход» [Пряничников, 2011] (рис. 3).



Рис. 3. РТК BROKK-110D (а), BROKK-330 (б), МР серии «Амур» (в), робот высокой проходимости «Марсоход» (г)

Работы по созданию СТЗ были выполнены для обеспечения спасательных операций, проводимых с использованием РТК. В рамках проекта на борт каждого РТК установлено по три стационарно закрепленных телекамеры с ИК-подсветкой (одна сзади и две спереди по бортам) и одна скоростная купольная телекамера, снабженная управляемым поворотом-наклоном механизмом и системой 10-кратного оптического масштабирования (PTZ). Кроме того, изготовлено три выносных модуля (ВМ): один для BROKK-110D и два для BROKK-330, снабженных такой же купольной телекамерой, и два репитера (по одному на каждый РТК). Имеется система дистанционного программного управления системой PTZ всех купольных телекамер (как на борту МР, так и на ВМ). Все компоненты СТЗ объединены в ЛВС.

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 10-07-00612а).

### ЛИТЕРАТУРА

- [Андреев и др., 2009] Андреев В. П., Кирсанов К. Б., Прысев Е. А., Пронкин В. Ю., Пряничников В. Е., Травушкин А. С. Построение системы технического зрения мобильного робота с использованием беспроводной технологии Wi-Fi // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7. № 6. С. 49–63.
- [Пряничников и др., 2011] Пряничников В. Е., Андреев В. П., Кирсанов К. Б. и др. Технологии модернизации и очувствления мобильных роботов специального назначения // Изв. Южного Федерального ун-та. Тех. науки. 2011. № 3. С. 166–171.

### THE APPLICATION OF NETWORK TECHNOLOGIES TO CONSTRUCTING MULTI-CAMERA CONTROLLED COMPUTER VISION SYSTEMS FOR MOBILE ROBOTS

V. P. Andreev, V. E. Pryanichnikov

*International Laboratory "SENSORIKA", Moscow  
Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow*

Based on the analysis of information streams in the information-measuring controlling systems (IMCS) for mobile robots (MR) with supervisory control, an integrated approach of constructing information-measuring systems with computer vision (CV) was put forward and their functional structure was identified, which all represents the base of the idea of constructing multi-camera controlled CV. The scheme, displaying dual movement structure of information streams in distributed IMCS MR with supervisory control, was suggested. CV MR was suggested to be regarded as a local area network (LAN) with mobile components.

*Keywords:* computer vision technology, information-measuring controlling systems, local area networks, supervisory control.

---

**Andreev Victor P.** — deputy director on scientific issues of the International Laboratory "SENSOR-IKA", doctor tech. sciences, senior research fellow, e-mail: andreevvipa@yandex.ru.

**Pryanichnikov Valentin E.** — leading researcher of the Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, doctor tech. sciences, professor of MSTU "Stankin", e-mail: val-rover@rambler.ru.

## АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БОРТОВОЙ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ УЛУЧШЕННОГО И СИНТЕЗИРОВАННОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. В. Бондаренко<sup>1</sup>, М. А. Бондаренко<sup>2</sup>, И. В. Докучаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Статья посвящена аппаратному решению задачи навигации мобильной техники посредством сбора, синтеза, обработки, микширования и вывода видеoinформации в реальном времени, полученной от источников гетерогенного мультиспектрального диапазона — радиолокаторов, лазерных датчиков, ИК- и ТВ-камер. Подобные системы используются для информированности в сложных внешних условиях, при автоматическом управлении и в пилотируемом режиме. Предложена аппаратная архитектура и алгоритмы решения задачи улучшения видения, повышения наглядности и сопоставления видеoinформации с телеметрией и базой навигационных данных. Навигационными данными могут быть трехмерные модели объектов, географические карты, изображения со спутников, координаты объектов. Уделено внимание аппаратному решению проблемы надежности системы.

*Ключевые слова:* системы технического зрения, обработка и синтез изображений, цифровые камеры, системы навигации, системы улучшенного видения.

### ВВЕДЕНИЕ

Под мобильной техникой понимают устройства, способные перемещаться в некоторой среде. Такие устройства могут быть автономными (роботами), пилотируемыми и управляемыми оператором на расстоянии. Наиболее важная задача управления — навигация мобильной техники в реальном времени в условиях недостаточного объема информации при работе в сложной внешней обстановке (ограниченной видимости из-за тумана, дыма и неблагоприятных метеословий). Неверное решение из-за недостаточной и/или ложной информированности — основная причина аварий и невыполнения миссий при управлении мобильной техникой. В настоящее время имеется множество устройств, работающих в диапазонах электромагнитных волн, где влияние факторов внешней среды сказывается в меньшей степени. Обычно используется пара камер видимого (ТВ) и ИК-диапазона, выводящая изображения оператору техники (пилоту) на дисплеи. При этом лишь в ряде систем к выводимым изображениям применяются функции обработки (улучшения), и то, в основном, это простейшие процедуры контрастирования. Большинство сертифицированных коммерческих систем, предлагаемых ведущими мировыми производителями, представляют собой неинтеллектуальные системы «датчик-дисплей», обеспечивающие передачу изображений и навигационных данных на различные индикаторы мобильной техники и/или системе управления без какого-либо их анализа и сопоставления. [Визильтер, Желтов, 2011].

---

Бондаренко Андрей Викторович — генеральный директор, e-mail: raster-msk@mtu-net.ru.

Бондаренко Максим Андреевич — аспирант, e-mail: max.bond@bk.ru.

Докучаев Игорь Вадимович — главный специалист, e-mail: olga\_igor@mail.ru.

Сейчас широко распространена аппаратная реализация многофункциональных бортовых систем модульной архитектуры: каждая функция, выполняемая системой, реализована в виде некоторого автономно работающего устройства со своей собственной памятью и блоком обработки (процессором). Такая архитектура называется модульным крейтом. К настоящему моменту утвержден стандарт подобных архитектур (Система сбора данных. Стандарт VXI. URL: [http://www.vxibus.org/files/VXI\\_Specs/VXI-1\\_4-0%2020100527.pdf](http://www.vxibus.org/files/VXI_Specs/VXI-1_4-0%2020100527.pdf)). Несомненно, крейт дает удобство сборки из стандартных модулей, тестирования, отладки, сертификации и комплектации без модификаций многофункциональной системы, однако требует существенной нагрузки по обмену данными между автономными устройствами и существенно большего количества интерфейсов. Все это в совокупности сильно усложняет структуру и логику работы, повышает массу и габариты, увеличивает уровень потребляемой энергии, понижает общую производительность и надежность системы. К тому же эта архитектура изначально не предназначалась для решения задач технического зрения. В силу сказанного, предлагается объединить архитектурно все вычислительные функции универсальной системы навигации в едином автономном вычислительном устройстве.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Несмотря на общность задачи навигации мобильной техники, можно достаточно определенно назвать требования, предъявляемые к подобным системам, а именно:

- надежность;
- устойчивость — слабое изменение входных данных влечет за собой слабое изменение выходных;
- интеллектуальность — авто настройка и принятие решений, удобство и качество выдаваемых данных;
- актуальность выходной информации, определяет работу системы навигации как работу в реальном времени.

Следуя этим требованиям, можно выделить основные подзадачи, решаемые системой навигации мобильной техники:

- предобработка изображений, полученных из источников разнородного спектрального диапазона;
- комплексирование данных изображений в одну картину более информативную, чем каждое из его составляющих по отдельности;
- распознавание объектов на синтезированном изображении;
- сопоставление информации об объектах с базой навигационных данных;
- совмещение сопоставленной информации из базы данных с объектами на изображении;
- вывод результата на TFT монитор.

Исходя из опыта разработки систем технического зрения, задачу обеспечения надежности системы предлагается решить с помощью:

- применения современной элементной базы и отработанных оригинальных схмотехнических решений;
- обеспечения автономной работы системы: даже в случае отказа управляющей бортовой ЭВМ, система продолжит работу;
- дублирования критических узлов и компонентов системы, посредством реализации соответствующей схемы 100%-го резервирования;



- протоколирования всей выходной информации и телеметрии на твердотельный носитель («черный ящик»);
- испытания готовой системы в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

## АРХИТЕКТУРА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

На рис. 1 представлена функциональная схема предлагаемой системы.

На рис. 2 представлена структурная схема автономного видеопроцессора, разработанная на базе системы [Бондаренко и др., 2012].

Обозначения на рис. 2: ВИП — вторичный источник питания; ГТИ — кварцевый генератор тактовых импульсов; MUX — мультиплексор; DSP (Digital Signal Processor) — процессор по обработке цифровых сигналов; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; VGA (Variable Gain Amplifier) — нормирующий видеосуилитель; SSD (Solid State Drive) — твердотельная память долговременного хранения; DAC (Digital Analog Converter) — 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); FLASH ROM — флеш-память; SATA (Serial ATA) — последовательный интерфейс обмена данными с накопителями информации; PLL — фазовая автоподстройка частоты; FG (Frame Grabber) — оцифровка аналогового сигнала; DVI (Digital Visual Interface) — цифровой видеоинтерфейс; SER/DES (Serialization/Deserialization Interface) — интерфейс приема-передачи видеоданных; LII (LIDAR Information Interface) — интерфейс обмена данными, поступающими с лазерного лидара.

В рассматриваемой комплектации в систему предлагается включить: две цифровые камеры видимого диапазона высокой четкости (на схеме обозначены как RT-10xxDC); три ИК-камеры ближнего, среднего и дальнего ИК-диапазона (IR-1, IR-2, IR-3); лазерный лидар видимого или ближнего ИК-диапазона.

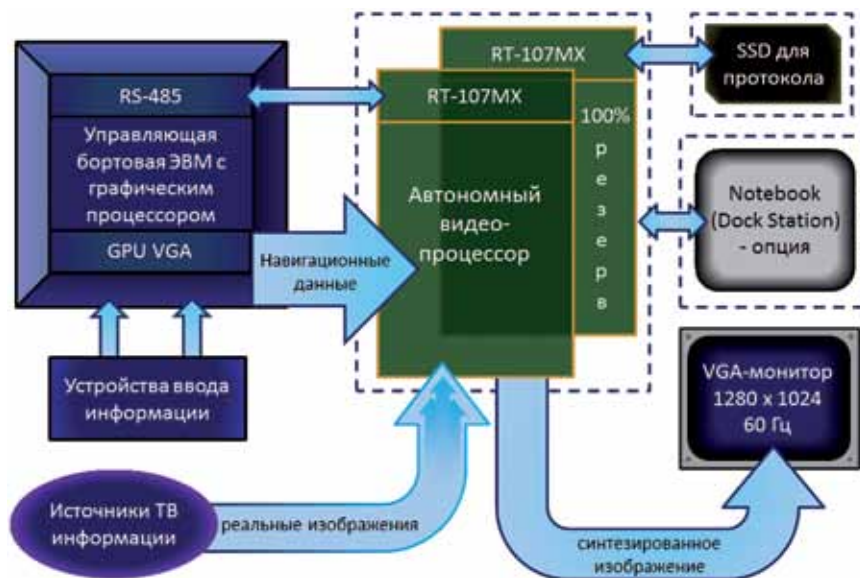


Рис. 1. Основные компоненты бортовой автономной системы улучшенного и синтезированного зрения для мобильной техники

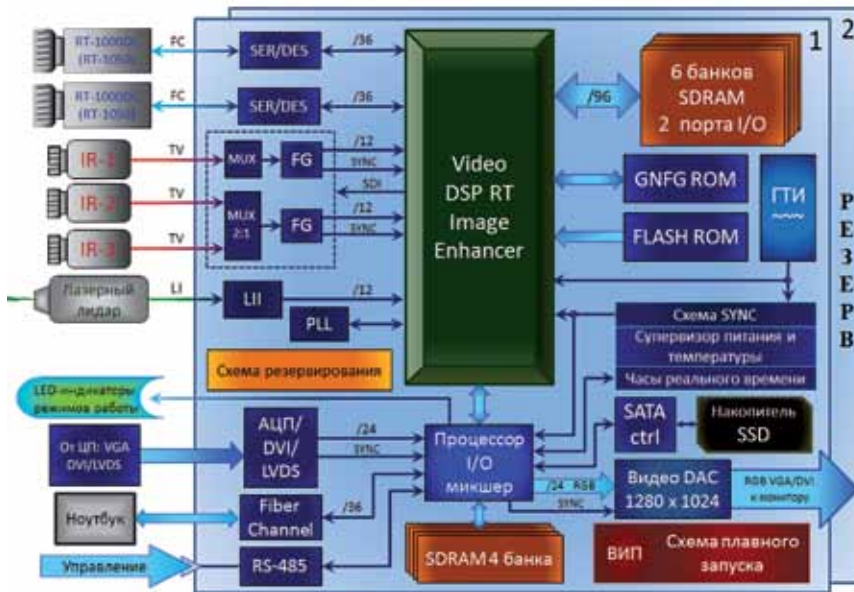


Рис. 2. Схема автономного видеопроцессора



Рис. 3. Функциональная схема ЦК RT-1000DC (RT-1050DC)

На рис. 3 представлена функциональная схема ЦК RT-10xxDC (Техническое описание камеры RT-1000DC. URL: <http://www.rastr.net/Download/Doc/Rt1000.pdf>).

Обозначения на рис. 3: CCD — ПЗС-матрица, преобразующая энергию фотонов света в энергию электрического заряда (прибор с зарядовой связью); DSP

(Digital Signal Processor) — процессор по обработке цифровых сигналов; ADC (Analog Digital Converter, АЦП) — аналого-цифровой преобразователь; VGA (Variable Gain Amplifier) — нормирующий видеосуилитель; CDS (Correlated Double Sampling, ДКВ) — двойная коррелированная выборка, способ оцифровки выходного аналогового сигнала матрицы, позволяющий снизить уровень шумов при аналого-цифровом преобразовании; DAC (Digital Analog Converter, ЦАП) — 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь; RAM (Random Access Memory) — 32-разрядный внутренний буфер памяти (8 МБ). Функционально разделен на 4 банка по 2 МБ. Используется контроллером DMA (Direct Memory Access), прямого доступа к памяти для бесперебойной скоростной пересылки видеоданных из блока фотоприемника в память ПЭВМ; LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) — низковольтная дифференциальная передача сигналов, позволяющая передавать информацию на высоких частотах при помощи дешевых соединений на основе медной витой пары

### ОБЗОР ИСПОЛЬЗУЕМЫХ АЛГОРИТМОВ

Всю обработку изображений предлагается реализовать аппаратно. Реализация алгоритмов на специализированной ПЛИС (программируемой логической интегральной схеме) позволит существенно ускорить их работу.

Исходя из минимизации потерь полезного сигнала, было решено отказаться от применения частотных фильтров, так как они сужают динамический диапазон изображения. На рис. 4 представлен пример потерь информации при подобном шумоподавлении тепловизионных изображений.

Поэтому шумоподавление будет выполняться с использованием:

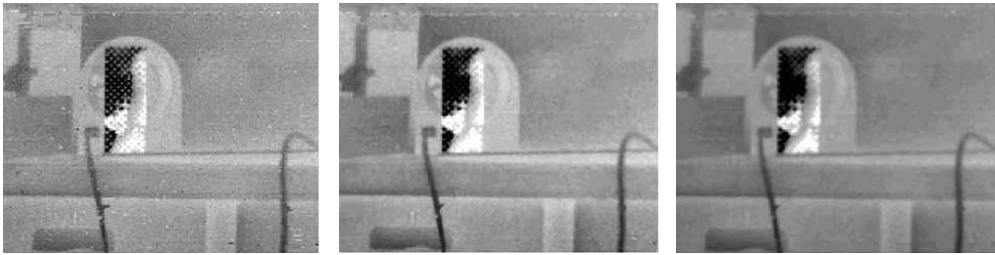
- усиления полезного сигнала — настройки камеры на динамический диапазон, при этом настройка проводится до оцифровки изображения в автоматическом режиме в зависимости от насыщения пикселей матрицы ЦК, работа с аналоговым сигналом снизит потери полезной информации при его обработке;
- обработка серии оцифрованных кадров за счет применения скоростных камер. Примеры аппаратной обработки серии кадров видеопроцессором RT-827VP (Техническое описание видеопроцессора RT-827VP. URL: <http://www.rastr.net/Download/Doc/Rt827.pdf>) представлены на рис. 5:

Коэффициент рекурсии  $k$  определяет соотношение между уровнем шумов слабоконтрастного изображения и динамикой его обновления. Результирующее изображение  $Y$  в  $n$ -м кадре вычисляется по формуле:

$$Y_n(i, j) = kX_n(i, j) + (1 - k)Y_{n-1}(i, j),$$

где  $X_n$  — оцифрованное изображение в  $n$ -ом кадре;  $Y_{n-1}$  — результирующее изображение в  $(n - 1)$ -м кадре;  $k = 7/32$  соответствует обработке в реальном времени при частоте кадров 120 Гц. Использование более скоростных ЦК не дает ощутимого повышения качества сигнала в силу уменьшения времени экспозиции одиночного кадра.

Любой способ комбинирования монохромных изображений в рамках одного цветового канала — потеря значимой информации каждого из каналов. Поэтому предлагается объединять разнеспектральные изображения, приведенные к единому формату, в цветные, где каждому цветовому каналу соответствует

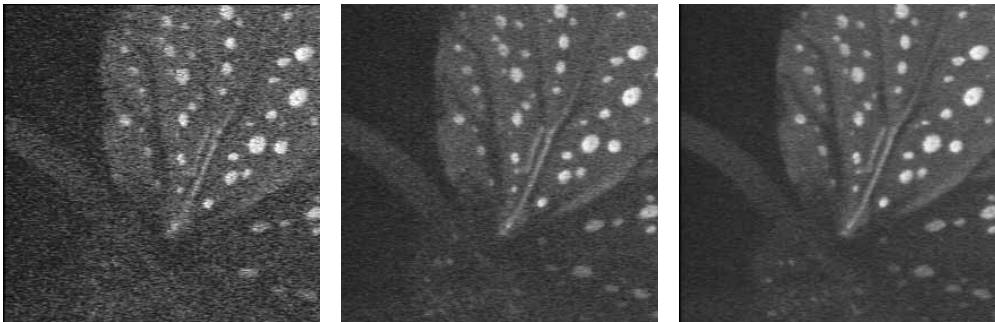


*Исходное ИК изображение*

*Медианный фильтр 3×3*

*Низкочастотный фильтр*

**Рис. 4.** Потери деталей при шумоподавлении частотными фильтрами



*Исходное зашумленное изображение (часть листа бегонии)*

*Усреднение по четырем кадрам*

*Обработка одномерным рекурсивным фильтром с коэффициентом 7/32*

**Рис. 5.** Пример применения аппаратной рекурсивной фильтрации в реальном времени

свое изображение. Это обеспечит наиболее информативный результат комплексирования, т. е. на выходе получаем цветное RGB-изображение, где, например, R и B компонентам цвета соответствуют ИК-монохромные каналы, а компоненте G — монохромные каналы видимого диапазона. Выбор условных цветов зависит от особенностей задачи.

Задача распознавания объектов на изображении ставится в самом общем случае. На содержание анализируемого синтезированного изображения не накладывается каких-либо ограничений в силу универсальности предлагаемой системы навигации. Условимся считать объектом на изображении область, ограниченную замкнутым контуром, который был получен как результат работы фильтра определения границ. Задача сопоставления с последующим распознаванием объекта для его дальнейшего совмещения с пространственными навигационными данными некорректна, так как имеет не единственное решение: по одной проекции невозможно понять форму объекта, даже если этот объект выпуклый. Если решение найдено, то оно не будет устойчивым, ибо любое слабое изменение монохромной текстуры объекта способно повлечь кардинальное изменение представления о форме, а значит, и типе объекта.

Конечно, можно попробовать получить карту нормалей видимого объема, исходя из значений пикселей, но это будет корректно работать лишь для объектов с постоянным альбедо поверхностей. В работе [Pong, Cham, 2006] показано, что нельзя получить строгой зависимости значений векторов нормалей объекта в случае переменного альбедо.



Рис. 6. Схема совмещения синтезированного изображения и 3D-моделей

Лазерный лидар будет использоваться для получения карты нормалей, не искаженной текстурой наблюдаемого объекта. При этом точное совмещение данных, полученных с лидара, и синтезированного изображения достигается с помощью юстировки системы на наборе тестовых изображений. На рис. 6 представлена схема совмещения синтезированного изображения и 3D-моделей.

Основной недостаток предложенного метода — ограничение на дальность действия лазерного лидара. На расстояниях, больших определенного значения, он не будет успевать сканировать объекты в реальном времени. Импульсы лидара падают и отражаются обратно, проходя расстояние  $2R$ , где  $R$  — среднее расстояние до сканируемой поверхности. Тогда оценочное время сканирования  $t$  области интереса считается по формуле:

$$t = MN \frac{2R}{vc},$$

где  $M, N$  — число импульсов по горизонтали и вертикали;  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света;  $v$  — максимальная частота импульсов выбранного лидара.

Пусть  $v = 40$  Гц (Техническое описание лазерного лидара ПАЛ-2. URL: [http://www.laser-design.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=10:-2&catid=5:2011-01-05-05-14-36&Itemid=5](http://www.laser-design.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=10:-2&catid=5:2011-01-05-05-14-36&Itemid=5)),  $R = 500$  м,  $M = N = 1024$ , тогда время сканирования при указанных значениях будет примерно 0,0874 с. Очевидно, что для достижения реального времени работы системы, сканирование необходимо сократить до  $1/25 = 0,04$  с. Проблему ускорения сканирования лидаром можно решить установкой нескольких таких устройств, параллельно сканирующих заданную область или повышением частоты импульсов лидара (в рассмотренном случае минимум в 2 раза) с соответствующим повышением мощности импульсов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании более чем 20-летнего опыта разработки видеопроцессоров реального времени, предложена универсальная архитектура мультиспектральной си-

стемы технического зрения, соответствующая космическим стандартам надежности. Предложены простые для аппаратной реализации и эффективные методы обработки изображений в рамках задачи навигации мобильной техники на примере объединения синтезированного изображения и пространственных навигационных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Бондаренко и др., 2012] *Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Рода А. В., Хаджиева Я. Я.* Обзорно-панорамная оптико-электронная система наблюдения и обнаружения для мобильной наземной техники // Сб. тр. научно-тех. конф. «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2011» / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 50–57.
- [Визильтер, Желтов, 2011] *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.* Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Тр. научно-тех. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова, М.: КДУ, 2011. С. 11–44.
- [Pong, Cham, 2006] *Pong Hon-Keat, Cham Tat-Jen* Alignment of 3D Models to Images Using Region-Based Mutual Information and Neighborhood Extended Gaussian Images // Proc. Asian Conference on Computer Vision (ACCV). Hyderabad, India. 2006. P. 60–69.

## HARDWARE REALIZATION OF THE ENHANCED AND SYNTHESIZED VISION ONBOARD AUTONOMOUS SYSTEM OF MOBILE EQUIPMENT

A. V. Bondarenko<sup>1</sup>, M. A. Bondarenko<sup>2</sup>, I. V. Dokuchaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Raster Technology Co. Ltd, Moscow*

<sup>2</sup> *The Lomonosov Moscow State University*

The article presents the mobile equipment navigation task hardware decision by gathering, synthesis, processing, multiplexing and real time video data output. This data is got from sources of heterogeneous multispectral diapason, such as radio locators, LASER LIDARS, IR and TV cameras. The similar systems are used for information supporting in difficult environment conditions both at an automatic control and in a pilotage case. The hardware architecture and the enhanced vision, video and navigation data alignment algorithms are proposed. The navigation data can content 3D models of the environment objects, geographic maps, images from the artificial satellites, objects' coordinates. Hardware reliability problem decision is considered.

*Keywords:* technical vision system, image processing and synthesis, digital cameras, navigation and enhanced vision systems.

---

**Bondarenko Andrey V.** — general director, e-mail: raster-msk@mtu-net.ru.

**Bondarenko Maxim A.** - post-graduate student, e-mail: max.bond@bk.ru.

**Dokuchaev Igor' V.** — chief specialist, e-mail: olga\_igor@mail.ru.

## РЕФЕРЕНСНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 4D/RCS (по материалам National Institute of Standards and Technology)

**В. А. Гришин**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

Дается краткое описание состояния дел в области использования методов искусственного интеллекта для решения задач управления мобильными робототехническими комплексами высокой автономности. Приведены препятствия, стоящие на пути использования таких методов. Дано краткое описание основных идей референсной архитектуры 4D/RCS (National Institute of Standards and Technology), предназначенной для построения бортовых систем искусственного интеллекта.

*Ключевые слова:* бортовые системы автономного искусственного интеллекта, системы обработки информации и управления, системы реального времени.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы искусственного интеллекта (ИИ), особенно мобильные системы автономного ИИ, играют все большую роль в нашей жизни. Классическая область применения таких систем — так называемые DDD — задачи (Dangerous, Dirty, and Dull — опасные, грязные и тупые). Помимо производственных, под эту категорию попадают некоторые исследовательские задачи, а также практически все типы боевых действий. Расширяются области применения систем ИИ и в обычной практике. В частности, принят закон штата Невада, легализующий присутствие на дорогах автоматических транспортных средств — автомобилей без водителя [Autonomous..., 2011].

В докладе руководителя фирмы Rumpf Associates International, Inc., осуществляющей экспертные услуги в области безэкипажных систем (unmanned systems), отмечается возможность добиться полной автономности управления наземными системами к 2020 г. [Rumpf, 2008]. Хотя достижимость указанной цели к этому сроку и вызывает определенные сомнения, однако актуальность задачи несомненна. Расширяется применение средств ИИ в области беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [Unmanned..., 2005]. В частности, можно отметить прогрессирующий рост степени автономности используемых систем управления, вплоть до полностью автономной стаи (swarm).

Весьма интересной областью приложения методов ИИ становится новый и достаточно специфический класс задач, связанных с эффективным противодействием мобильным системам с экипажами на борту. Одна из таких задач была сформулирована автором в 2005 г. и касалась создания автономного, полностью автоматического подводного аппарата, способного длительное время эффективно противодействовать подводным лодкам с ядерной силовой установкой [Гришин, 2005]. Актуальность таких задач была подтверждена спустя всего 5 лет — в конце

---

**Гришин Владимир Александрович** — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru.

2010 г. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) приступило к реализации проекта, предусматривающего создание подобного аппарата для противодействия малозумным дизель-электрическим подводным лодкам [Broad..., 2011].

Можно сделать вывод, что использование систем ИИ будет активно расширяться в самых различных прикладных областях. В связи с этим, необходимо понять, насколько специалисты — разработчики систем управления готовы к массовому использованию методов ИИ. Следует уточнить, что в данном случае идет речь не об использовании каких-то отдельных технологий, носящем фрагментарный характер, а о новом подходе к разработке систем управления, включающих в себя тесно интегрированные подсистемы обработки сигналов датчиков (реализующие задачи информационного обеспечения), подсистемы синтеза управлений и их реализации [Grishin, 2010].

## МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В настоящее время накоплено огромное количество частных методов ИИ, казалось бы, пригодных для самых разнообразных задач. Однако, реальные физические объекты управления очень сложны, имеют сложные нестационарные системы ограничений на фазовые переменные и векторы управления. Это резко сужает возможность использования известных методов ИИ (по субъективным оценкам автора — как минимум на один, а то и на два порядка). Получается, что при всем богатстве выбора методов ИИ, реальный выбор весьма невелик. Кроме того, основная масса специалистов мало осведомлена даже о тех методах ИИ, которые действительно могут эффективно использоваться для создания перспективных систем управления.

Возникает вопрос, кто может реально разрабатывать системы ИИ? Среди специалистов по ИИ очень мало людей, знакомых с методами описания, разработки и исследования систем управления, и обучить их этому практически нереально. Возможен только вариант обучения специалистов, уже связанных с разработкой реальных систем управления, методам ИИ, которые имеют **практическую ценность**.

Представляется, что в настоящее время можно выделить три основных направления развития методов ИИ, предназначенных для создания автономных систем управления мобильными объектами.

Во-первых, среди разнообразия существующих методов ИИ следует выделить и развивать наиболее подходящие (адекватные) для создания систем управления сложными динамическими объектами в реальном мире. Таких методов окажется не слишком много. Это позволит прикладным специалистам не тратить значительных усилий на изучение методов и подходов, которые представляются мало-перспективными, либо совсем бесполезными для целей создания систем управления. Одна из попыток решения этой задачи рассматривается в работе [Grishin, 2010, 2012].

Во-вторых, для этих методов необходимо создать описание на основе системы понятий и представлений классической теории систем управления, т. е. в той форме, которая понятна и естественна для разработчиков этих систем. В качестве таких понятий, по мнению автора, могут быть использованы пространство состояний и операторы преобразований в этом пространстве с соответствующим расширением и обобщением этих понятий.



В-третьих, потребуется разработать эффективные унифицированные архитектуры систем управления, способные функционировать в сложных, неопределенных, быстро изменяющихся условиях, принимать самостоятельные решения и реализовать их. Важность этой задачи обусловлена тем, что системы управления на основе ИИ обладают очень высокой сложностью, и без четкой и понятной архитектуры построения таких систем не может быть обеспечена надежность и устойчивость их функционирования. Кроме того, в рамках несовместимых архитектур невозможно накопление алгоритмов управления и структур представления информации и ее обработки, необходимых для совершенствования уже созданных систем и разработки новых поколений такой техники. Особенно следует подчеркнуть, что важнейшее требование к архитектуре системам ИИ — очень хорошая совместимость с классическими системами обработки информации и управления.

### АРХИТЕКТУРЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В настоящее время известно весьма большое количество архитектур систем, относящихся к области ИИ, и определить, сколько их всего существует, не представляется возможным. Только на сайте [Comparative..., 2011] перечислено более 26 архитектур. Можно предположить, что сейчас их существует порядка сотни, и большая часть из них предназначена для решения таких задач, как исследование функционирования мозга, его нервных сетей, процессов мыслительной и/или познавательной деятельности человека, процессов обучения, решения задач и т.д. Для нас более интересны результаты исследований в этой области, связанные с такими организациями, как DARPA, DOD (Department of Defense), NASA, JPL (Jet Propulsion Laboratory), а также в области робототехники. Однако и здесь список архитектур получается весьма обширным. Вот только некоторые из них: MARS, UGCV, UGV Demo II, FCS-C, TMR, LAGR, SAL: ACT-R, Leabra, TOSCA — SOAR, CHIPS, JAUS, JTA (JTADG), SAUSAGES, MRHA, 4D/RCS CLARAty, NASREM, 3-Tiered (3T), Pilot's Associate, SOAR, ACT-R, Subsumption, AuRA, Atlantis. Такое разнообразие архитектур становится заметным тормозом на пути развития систем ИИ. По этой причине весьма актуальными становятся работы по унификации архитектур, интерфейсов, коммуникационных стандартов, моделей представления информации, библиотек знаний, позволяющие накапливать задел и использовать его для будущих разработок.

По мнению автора, наибольший интерес представляет архитектура 4D/RCS, разрабатываемая в National Institute of Standards and Technology (США) [Albus et al., 2002; Intelligent..., 2006]. Данная архитектура разрабатывалась в течение более 30 лет и предназначена для разработки систем управления реальных роботов. Вложения в разработку составили более 125 млн дол. Архитектура отработывалась на нескольких мобильных роботах, в том числе в рамках проекта Learning Applied to Ground Robots — LAGR, финансировавшегося со стороны DARPA. По результатам разработки реальных систем опубликовано несколько книг и масса статей. Эта архитектура предназначена для разработки систем ИИ, способных работать как в режиме телеуправления, так и автономного управления. В последнем случае предполагается возможность эффективного взаимодействия с людьми непосредственно в боевых порядках. В данной архитектуре существенно используется иерархичность задач и управлений на каждом уровне общности. Для деления

на уровне иерархии используется достаточно разумный подход, основанный на времени реакции (длительность цикла обработки информации и планирования действия) и на размере пространства, в рамках которого осуществляется действие данного уровня абстракции. Причем реализация действий на каждом уровне абстракции осуществляется на основе базисной структуры с обратной связью, что хорошо согласуется с классическими системами управления реальных динамических объектов. Сама структура отличается простотой и логичностью. Рассмотрим основную структурную единицу этой архитектуры, представленную на рис. 1.

На рис. 2 для сравнения представлена структурная схема классического контура управления.

Можно отметить, что основные отличия структуры, представленной на рис. 1 от структуры, представленной на рис. 2, заключаются в наличии модели мира и блока генерации поведения (выделены серым цветом на рис. 1). Если взять, например, классический ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор), то он обеспечивает одно единственное поведение, описываемое его уравнением, в которое в виде коэффициентов уже включена модель мира.

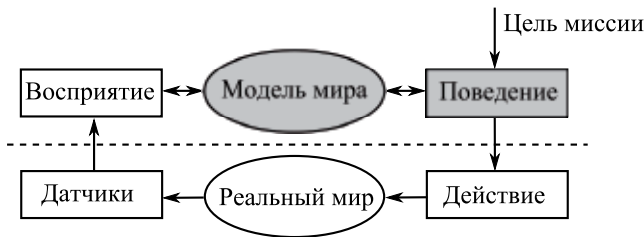


Рис. 1. Основной структурный элемент архитектуры 4D/RCS

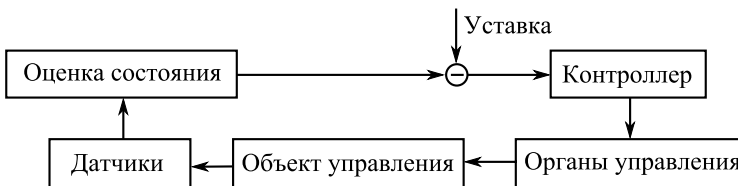


Рис. 2. Классический контур управления

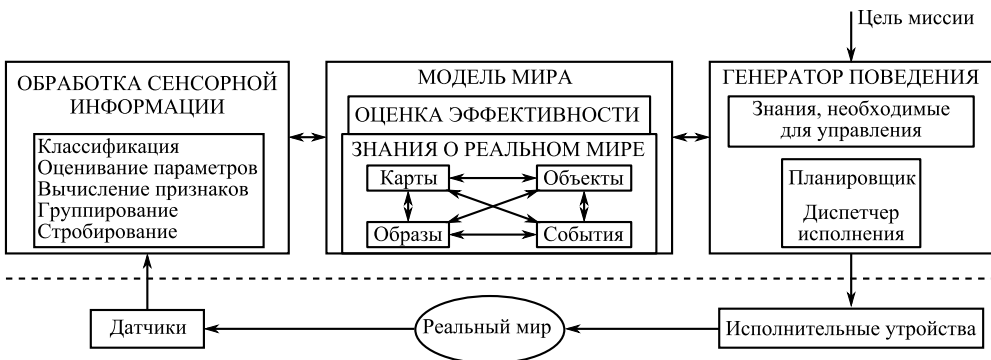


Рис. 3. Содержание блоков обработки сенсорной информации, модели мира и блока генерации поведения

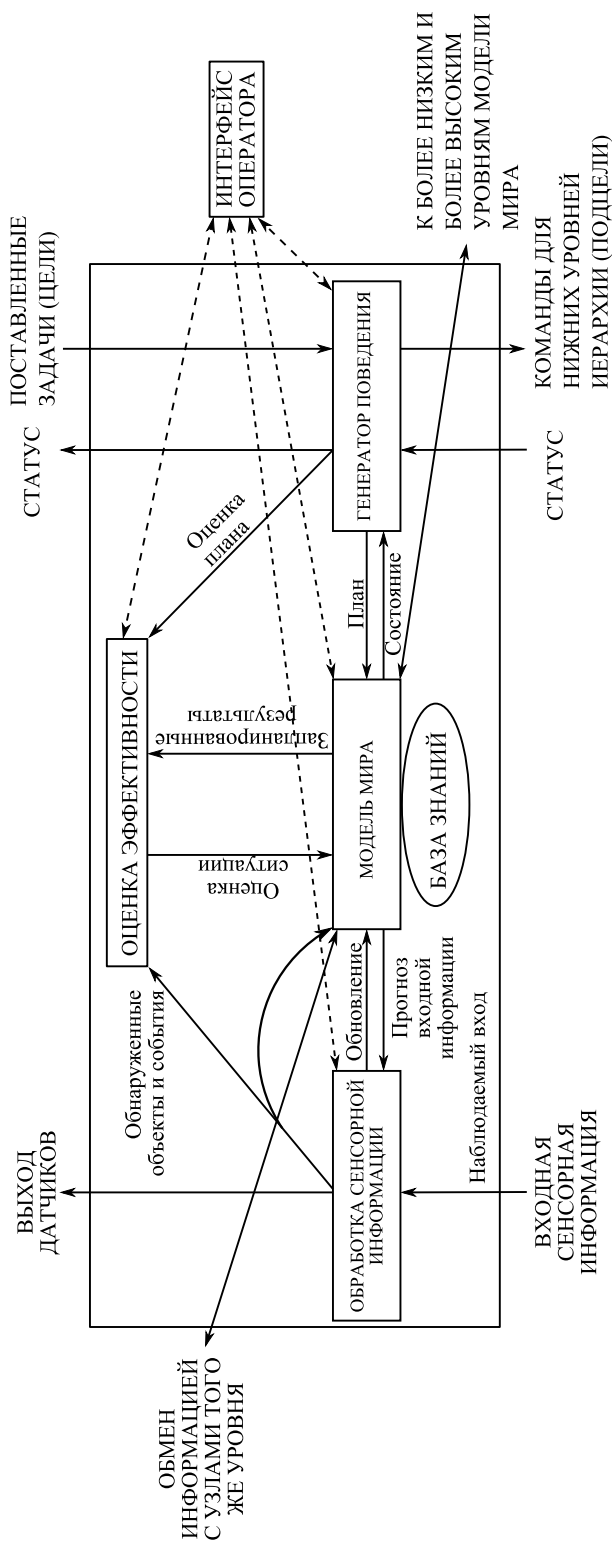
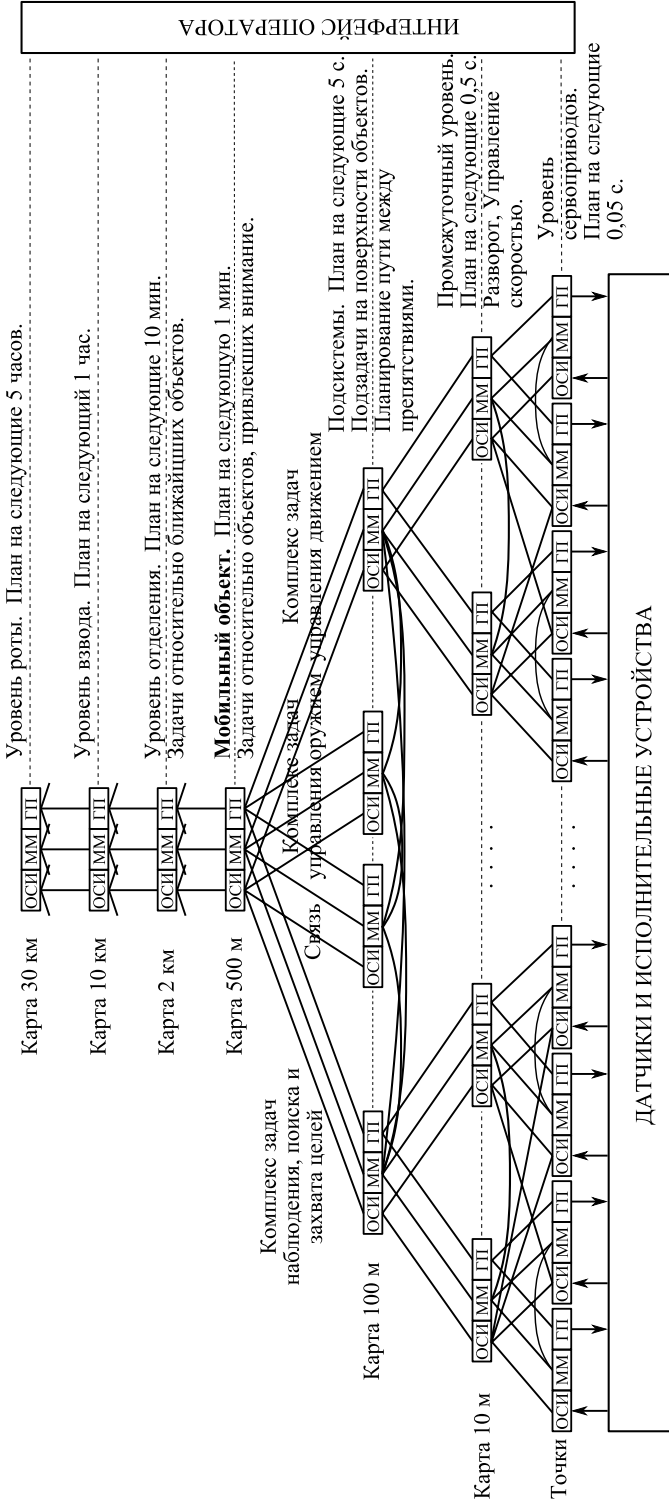


Рис. 4. Взаимодействие основных блоков архитектуры в процессе решения задач управления в режиме реального времени



**Рис. 5.** Мобильный объект в структуре иерархической системы управления уровня роты, которая может включать до 30—40 таких объектов

На рис. 3 более подробно раскрыто содержание блоков обработки сенсорной информации, модели мира и блока генерации поведения.

На рис. 4 представлено взаимодействие этих блоков в процессе решения задач управления в режиме реального времени.

На рис. 5 представлена иерархическая структура, отражающая как архитектуру самого мобильного объекта, так и вышележащих уровней управления. Показаны также основы иерархической декомпозиции задач — время цикла планирования и размер области пространства, на котором осуществляется планирование. На рисунке использованы сокращения: ОСИ — обработка сенсорной информации, ММ — модель мира, ГП — генератор поведения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены первоочередные (по мнению автора) задачи в области развития систем управления на основе автономного искусственного интеллекта, а также рассмотрена перспективная в этом плане 4D/RCS — архитектура систем искусственного интеллекта.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Гришин, 2005] *Гришин В. А.* Автономный подводный аппарат // Материалы 9-й Международ. научно-тех. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». 2005. Ч. 2. С. 103–105.
- [Albus et al., 2002] *Albus J. S.* et al. 4D/RCS Version 2.0: A Reference Model Architecture for Unmanned Vehicle Systems: Internal Report (NISTIR)-6910. National Inst. Standards and Technology. Gaithersburg, MD. 2002.
- [Autonomous..., 2011] Autonomous Vehicle Law Passes in Nevada: Driverless Cars Could Hit the road in 2012. The Huffington Post, June 25, 2011. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.huffingtonpost.com/2011/06/24/autonomous-vehicle-law-nevada\\_n\\_884307.html](http://www.huffingtonpost.com/2011/06/24/autonomous-vehicle-law-nevada_n_884307.html).
- [Broad..., 2011] Broad Agency Announcement. ASW Continuous Trail Unmanned Vessel (ACTUV) Phases 2 through 4. Tactical Technology Office (ТТО). DARPA-BAA-12-19. December 13, 2011.
- [Comparative..., 2011] Comparative Table of Implemented Cognitive Architectures 2011. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://bicasociety.org/cogarch/architectures.htm>.
- [Grishin, 2010] *Grishin V.* Computer Vision and Artificial Intelligence in Flight Control of Unmanned Aerial Vehicles // J. Information, Intelligence and Knowledge (JIИK). 2010. V. 2. Iss. 4. P. 327–338.
- [Grishin, 2012] *Grishin V.* Application of Artificial Intelligence Methods in Unmanned Aerial Vehicle Control // J. Information, Intelligence and Knowledge (JIИK). 2012. V. 3. Iss. 4. (To be published.)
- [Intelligent..., 2006] Intelligent Vehicle Systems: A 4D/RCS Approach / Eds. Madhavan R., Messina E. R., Albus J. S. Nova Science Publishers Inc.: N. Y., 2006.
- [Rumpf, 2008] *Rumpf R.* Ground Robotics Studies and Strategic Planning. 2008. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://www.dtic.mil/ndia/2008groundrobot/RUMPF.pdf>.
- [Unmanned..., 2005] Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap, 2005–2030. 2005. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.fas.org/irp/program/collect/uav\\_roadmap\\_2005.pdf](http://www.fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap_2005.pdf).

**THE REFERENCE ARCHITECTURE OF CONTROL SYSTEMS BASED  
ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE 4D/RCS (on materials of the National  
Institute of Standards and Technology publications)**

*V.A. Grishin*

*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow*

The article gives a brief description of the state of the art in the usage of artificial intelligence methods to control problems of high autonomy mobile robotics complexes and systems. There are listed some obstacles that stand in the way of such method's application. Brief description of the basic ideas of the reference architecture 4D/RCS (National Institute of Standards and Technology) is done. This architecture is designed to build the on-board artificial intelligence control systems.

*Keywords:* autonomous on-board systems of artificial intelligence, information processing and control, real-time systems.

---

**Grishin Vladimir Alexandrovich** — Senior Scientist, PhD, Associate Professor, e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru.

**Секция 3**  
**СИСТЕМЫ**  
**КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

## **ВИРТУАЛЬНЫЕ ГРАНИЧНЫЕ ТОЧКИ И КОНТУРЫ КОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ: НОВЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДВИЖЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

**К. И. Кий**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша  
Российской академии наук (ИПМ РАН), Москва*

Описывается новый метод анализа движения в режиме реального времени на видеоизображениях. В его основе — ранее предложенный автором метод геометризованных гистограмм. Анализ видеоизображений сводится к изучению движения виртуальных контрастных граничных точек на структурном графе цветовых сгустков видеопоследовательностей. Разработанный метод позволяет анализировать движение в случаях, когда регистрирующая камера установлена на подвижном объекте (мобильном роботе), движение осуществляется на разных уровнях глубины сцены, в разных направлениях и движущиеся объекты имеют разные размеры. Приводится пример обработки кадра в видеопоследовательности.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, сегментация изображений, анализ движения, зрение роботов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на достижения в анализе динамических сцен с помощью различных методов [Визильтер и др., 2010; Baker, Matthews, 2004; Mittal et al., 2009], проблема анализа движения (изменений) для сложных сцен, особенно при съемке с быстро движущегося объекта (мобильного робота), и когда осуществляется множественное движение на разных уровнях и при разных размерах движущихся объектов, далека от полного решения. Возникает также необходимость путем одновременного распознавания движущихся объектов (помех) повысить надежность системы или уменьшить число обращений к оператору системы наблюдения.

В работе представлен подход к анализу движений, основанный на методе геометризованных гистограмм [Кий, 2009, 2010; Kiy, 2010] с учетом выделения стабильных компонент сегментации — виртуальных граничных точек и граничных кривых контрастных объектов на изображении [Кий, 2011, 2012]. Существенную часть подхода составляет построение стабильных частей виртуальных граничных кривых контрастных объектов на изображении.

Виртуальные граничные точки и кривые контрастных областей расположены на графе цветовых сгустков, поставленном в соответствие каждому цветному изображению. Им ставятся в соответствие некоторые точки и кривые на изображении, которые аппроксимируют соответствующие граничные точки и кривые реальных областей [Кий, 2010; Kiy, 2010].

Большой интерес представляет оценка движения виртуальных граничных кривых и угловых виртуальных граничных точек (прослеживание траектории их движения на последовательности структурных графов цветовых сгустков, поставленных в соответствие кадрам видеопоследовательности). Эта оценка в свою

---

**Кий Константин Иванович** — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: kikip\_46@mail.ru.



очередь дает непиксельный метод анализа движения в видеопоследовательностях. Что особенно важно, данный метод дает возможность анализировать движение с движущегося объекта. В этом случае точки и кривые интереса осуществляют сложное движение на плоскости изображения.

Разработанные алгоритмы нахождения виртуальных граничных точек и построения виртуальных граничных кривых контрастных областей позволяют анализировать их движения в реальном времени для стандартных видео-форматов на современных персональных компьютерах.

## АНАЛИЗ СОСЕДНИХ КАДРОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ И ДВИЖЕНИЙ

Изменение ситуации в видеопоследовательности оценивается с помощью изучения движения контрастных виртуальных граничных точек на структурных графах цветовых сгустков  $STG(F_i)$ , где  $F_i$  — кадр видеопоследовательности с номером  $i$ , задаваемый некоторым цветным изображением. Определение структурного графа цветных изображений с необходимыми деталями может быть найдено в [Кий, 2009, 2010, 2012; Kiy, 2010]. Опишем неформально эту структуру.

Для получения  $STG(F_i)$ , изображение разбивается на узкие полосы одинаковой ширины, параллельные вертикальной или горизонтальной осям изображения.  $STG(F_i)$  разбивается на слои, каждый из которых соответствует некоторой полосе разбиения. С помощью процедур, приведенных в работах [Kiy, 2010; Кий, 2010; Кий, 2011], каждая полоса сжато описывается с помощью системы цветовых сгустков — отрезков на оси системы координат плоскости изображения  $O_s$ , которой параллельны стороны полос разбиения, снабженных числовыми характеристиками. Цветовому сгустку  $B$  ставятся в соответствие  $[IntBeg_B, IntEnd_B]$  — начало и конец  $B$  на оси  $O_s$ ;  $\Delta_H^B = [H_{min}^B, H_{max}^B]$  и  $H_{mean}^B$  — диапазон и среднее значение цветового оттенка  $B$ ;  $\Delta_S^B = [S_{min}^B, S_{max}^B]$  и  $S_{mean}^B$  — диапазон и среднее значение цветового насыщения;  $\Delta_I^B = [I_{min}^B, I_{max}^B]$  и  $I_{mean}^B$  — диапазон и среднее значения полутоновой компоненты  $B$ , и мощность сгустка  $Card^B$  (приблизительно, число точек в прообразе интервала в полосе, которые имеют цветовые характеристики, принадлежащие диапазонам цветового сгустка). Неформально каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось  $O_s$  и описание значений численных характеристик этой части объекта.  $STG(F_i)$  можно интерпретировать геометрически с помощью наложения его отрезков на центральную линию соответствующей полосы.  $STG(F_i)$  дает абстрактное описание некоторой предварительной сегментации (pre-segmentation) изображения  $F_i$ .

Реальные изображения, с которыми приходится работать в робототехнике, содержат существенные помехи. Они вызывают изменения  $STG(F_i)$ . Естественно попытаться выделить его стабильную часть, соответствующую реальным объектам. Такая попытка была сделана в работах [Кий, 2011, 2012].

На основе анализа работы человеческого зрения были разработаны способы определения контраста или его отсутствия для базисных цветовых сгустков, порождающих полосу. Граничные точки некоторых базисных цветовых сгустков признаны контрастными, и каждой такой точке приписан некоторый уровень контраста. Такие граничные точки цветовых сгустков называются левыми (правыми) виртуальными контрастными граничными точками. Виртуальными они

названы потому, что лежат не на изображении, а на  $STG(F_i)$ . Для каждой левой (правой) виртуальной контрастной граничной точки однозначно определен левый (правый) граничный цветовой сгусток, который создает контраст с цветовым сгустком данной виртуальной граничной точки. Таким образом, на множестве цветовых сгустков с контрастными границами задается частичное соотношение порядка.

Виртуальные контрастные граничные точки выделялись на большом количестве изображений различных видеопоследовательностей и результаты экспериментов с ними подтверждают то, что эти точки характеризуют стабильные компоненты полученной предварительной сегментации. Более того, анализ многочисленных видеопоследовательностей сцен, типичных для навигации автономных роботов, показывает, что полученные стабильные компоненты хорошо соответствуют (при наложении  $STG(F_i)$  на центральные линии полос разбиения) границам реальных объектов в кадрах.

Рассмотрим метод нахождения соответствия виртуальных контрастных граничных точек и изменения их положения относительно изображения на соседних кадрах  $F_i$  и  $F_{i+1}$  некоторой видеопоследовательности  $F_i, i = 1, \dots, N$ . Предположим для определенности, что мы имеем дело с разбиением изображения на горизонтальные полосы. Рассмотрим полосу с номером  $k$  на кадре  $F_i$ . Выберем в ней некоторую левую (правую) виртуальную контрастную точку  $c_l$  ( $d_l$ ). Данной виртуальной контрастной точке соответствуют: цветовой сгусток  $B(c_l)$  с характеристиками ( $[IntBeg_B, IntEnd_B], \Delta_H^B, H_{mean}^B, \Delta_S^B, S_{mean}^B, \Delta_I^B, I_{mean}^B, Card^B$ ) (далее будем вести рассуждения только для левых виртуальных контрастных граничных точек), границей которого является точка  $c_l$ ; цветовой сгусток  $BL(c_l)$  с характеристиками ( $[IntBeg_{BL}, IntEnd_{BL}], \Delta_H^{BL}, H_{mean}^{BL}, \Delta_S^{BL}, S_{mean}^{BL}, \Delta_I^{BL}, I_{mean}^{BL}, Card^{BL}$ ) —контрастный к сгустку  $B$  и расположенный слева от  $B$ .

Нам необходимо найти в полосе с номером  $k$  (возможно также расширить область поиска для очень быстрых процессов, включая соседние полосы с номерами  $k+1, k-1$  и т. д.) кадра  $F_{i+1}$  виртуальную контрастную граничную точку  $c'_l$  сгустка  $B'$  с характеристиками ( $[IntBeg_{B'}, IntEnd_{B'}], \Delta_H^{B'}, H_{mean}^{B'}, \Delta_S^{B'}, S_{mean}^{B'}, \Delta_I^{B'}, I_{mean}^{B'}, Card^{B'}$ ), которая была бы изображением в  $F_{i+1}$  физической точки, соответствующей  $c_l$  (минимальное соответствие). Далее показать, что левый контрастный сгусток  $B'L(c'_l)$  в некотором смысле соответствует  $BL(c_l)$  (сильное соответствие контрастных точек). Неформально, это соответствует движению границы между соседними областями, имеющими одинаковую глубину. Например, в случае возникновения заслонений, когда соседний контрастный сгусток может радикально меняться.

Для установления соответствия виртуальных контрастных граничных точек на соседних кадрах используется процедура, аналогичная процедуре продолжения цветовых сгустков с одной полосы на соседнюю на одном изображении (построение глобальных объектов) [Кий, 2010]. Однако в данном случае процедура работает с полосами соседних изображений и только с контрастными цветовыми сгустками.

В [Кий, 2011, 2012] были описаны основные идеи построение эвристической процедуры определения похожести-различия цветовых сгустков с использованием свойств человеческого зрения. В этих работах мы интересовались, в основном, частью процедуры, связанной с прописыванием значения контрастов между цветовыми сгустками. В данной работе применяется часть процедуры, определяющая похожест цветных сгустков.

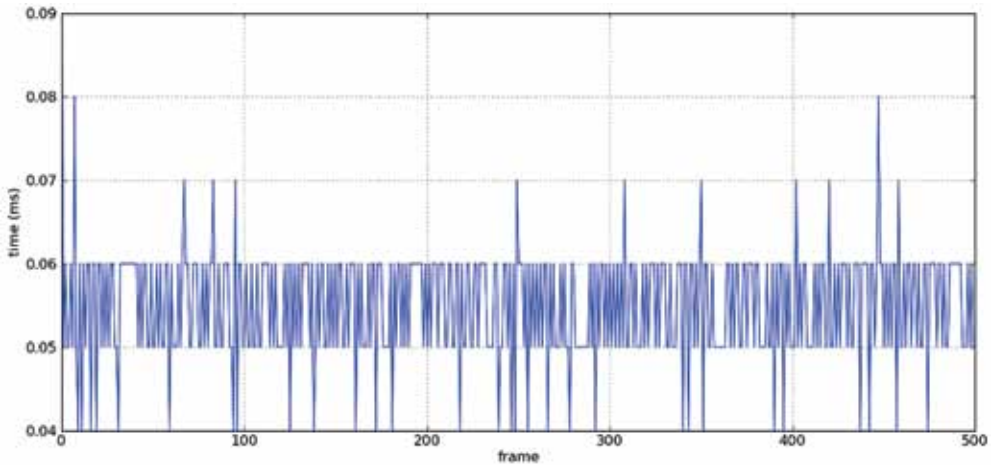
Пусть выбрана некоторая окрестность  $U_B$  отрезка цветового сгустка  $B$  на оси  $O_s$ , содержащая его интервал  $U_B \supset [IntBeg_B, IntEnd_B]$ . Рассмотрим цветовые сгустки  $B_c$  полосы кадра  $F_{i+1}$  с номером  $k$  такие, что  $[IntBeg_{B_c}, IntEnd_{B_c}] \cap U_B \neq \emptyset$ . Выберем среди всех  $B_c$ , имеющих левую контрастную границу, те, которые имеют лучшие значения функции соответствия – различия  $Discr(hue\_close, sat\_close, inten\_close)$  [Кий, 2011, 2012], где  $hue\_close$ ,  $sat\_close$  и  $inten\_close$  – некие функции измеряющие близость оттенка, насыщенности и интенсивности цветовых сгустков  $B$  и  $B_c$ . В случае нескольких кандидатов, выбирается тот, в котором интервалы  $(IntBeg_{B_c}, IntEnd_{B_c})$  и  $(IntBeg_B, IntEnd_B)$  наиболее близки в смысле метрик на пространстве интервалов, выведенных в [Кий, 2010] (сильно пересекаются) также как и в процедуре построения глобальных объектов, и контрастные точки  $(IntBeg_B$  и  $IntBeg_{B_c})$  наиболее близки как точки на оси  $O_s$ . Левая контрастная граница  $[IntBeg_{B_c}, IntEnd_{B_c}]$  считается соответствующей  $c_l$  и обозначается  $c'_l$ . С помощью аналогичной процедуры проверяется соответствие левых контрастных интервалов контрастных граничных точек  $c_l$  и  $c'_l$ .

Рассмотрим движение только вдоль оси  $O_s$ . После нахождения продолжения контрастной граничной точки в видеопоследовательности определяется смещение  $Sh = IntBeg_B - IntBeg_{B'}$  – разность координат (в пикселах) для соответствующих точек. Для каждой контрастной граничной точки запоминаем число предыдущих элементов в траектории и временной ряд длины  $d$  предшествующих смещений  $Sh[d] = \{Sh_1, \dots, Sh_d\}$ . Статистическим анализом временного ряда осмысленные (поступательные) движения отделяются от шума (нестабильности сегментации). Другие методы анализа, основанные на изучении структурных групп контрастных точек (контрастных кривых), будут представлены в следующих публикациях.

На рис. 1 показан кадр видеопоследовательности с движущимся предметом. Структурный граф цветовых сгустков наложен на срединные полосы полутонового изображения, соответствующего изображению кадра. Контрастные граничные точки выделены «усиками» – короткими вертикальными отрезками. К этим усикам пририсованы короткие горизонтальные отрезки, указывающие направление движения.



Рис. 1. Выделение движущегося объекта с помощью стандартной веб-камеры



**Рис. 2.** Запись времени обработки кадров для видеопоследовательности из 500 изображений

### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Система реализована в C++ (Visual Studio 2008 и Linux Ubuntu) вместе со средствами сопряжения и вводом изображений из телекамер с использованием DirectX SDK или средств Linux и OpenCV. Скорость обработки для цветных изображений  $640 \times 480$  — более 20 fps на процессоре Intel Core i5; для изображений  $320 \times 240$  — в четыре раза быстрее. График времени обработки 500 кадров видеопоследовательности на рис. 2 показывает стабильность времени, затраченного на анализ кадра.

### ВЫВОДЫ И СЛЕДУЮЩИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработаны методы определения движения виртуальных контрастных граничных точек. Обсуждены вопросы применения этих методов к анализу движения на видеоизображениях. Задачей дальнейших исследований представляется анализ более сложных форм движений с использованием одновременной обработки разбиений изображений на горизонтальные и вертикальные полосы. Предметом следующих публикаций станут применения структурных связей на графе цветовых ступок: анализ движения непрерывных граничных кривых контрастных областей, определение угловых точек контрастных областей и изучение их движения.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Визильтер и др., 2010] *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В.* и др. Обработка и анализ изображений в системах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010. 671 с.
- [Кий, 2009] *Кий К. И.* Геометризованные гистограммы и понимание изображений // Докл. 14-й Всерос. конф. «Математические методы распознавания образов-2009». М.: МАКС ПРЕСС, 2009. С. 362–365.
- [Кий, 2010] *Кий К. И.* Модифицированный метод геометризованных гистограмм и его применение // Докл. 8-й Международ. конф. «Интеллектуализация обработки информации ИОИ-2010». М.: МАКС ПРЕСС, 2010. С. 367–370.

- [Кий, 2011] *Кий К. И.* Метод геометризованных гистограмм, дуальное описание сцен и его применение // Докл. 15-й Всерос. конф. «Математические методы распознавания образов-2011». М.: МАКС ПРЕСС, 2011. С. 451–454.
- [Кий, 2012] *Кий К. И.* Структурный граф цветовых сгустков: структуры контрастов и их применение // Сб. тр. научно-технич. конф. «Техническое зрение в системах управления 2011» / Под ред. Р. Р. Назирова. Сер. «Механика, управление, информатика». М.: ИКИ РАН, 2012. С. 157–161.
- [Baker, Matthews, 2004] *Baker S., Matthews I.* Lucas-Kanade 20 years on: A unifying framework // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 56. N. 3. P. 221–255.
- [Kiy, 2010] *Kiy K. I.* A New Real-Time Method for Description and Generalized Segmentation of Color Images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. N. 2. P. 169–178.
- [Mittal et al., 2009] *Mittal A., Monnet A., Paragios N.* Scene modeling and change detection in dynamic scenes: A subspace approach // Computer Vision and Image Understanding 2009. V. 113. P. 63–79.

## **VIRTUAL BOUNDARY POINTS AND CONTOURS OF CONTRAST OBJECTS: A NEW APPROACH TO REAL-TIME MOTION ANALYSIS**

**K. I. Kiy**

*Keldysh Institute of Applied Mathematics  
Russian Academy of Sciences (IAM RAS), Moscow*

In this paper, a new real-time method for analyzing motion in video images is described. This method is based on the geometrized histograms method, proposed by the author. The motion analysis in video images is reduced to analysis of motion of virtual contrast boundary points on the structural graph of color bunches of the color images of a video sequence. The developed method makes it possible to analyze motion in images even in cases when the registering camera is mounted on a moving object (mobile robot), the objects move at different depth levels, in different directions, and have different dimensions. An example of processing a frame of a video sequence is presented.

*Keywords:* computer vision, image segmentation, motion analysis, robot vision.

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К СЛЕЖЕНИЮ ЗА ОБЪЕКТОМ, РАЗМЕРЫ КОТОРОГО ЗНАЧИТЕЛЬНО ИЗМЕНЯЮТСЯ СО ВРЕМЕНЕМ

**С. Е. Корепанов, В. В. Стротов**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВПО «РГРТУ», РГРТУ)*

Предлагается комплексный подход к слежению за объектом, размеры которого значительно изменяются со временем. Подход построен на сочетании двух алгоритмов слежения, первый из которых основан на методе пространственно-временной фильтрации, второй — на корреляционном и структурном методах. Переключение между алгоритмами производится в зависимости от оценок размеров объекта на наблюдаемом изображении.

*Ключевые слова:* слежение, изменение размеров объекта, комплексный подход, оценка параметров.

### ВВЕДЕНИЕ

Слежение за выбранным объектом одна из наиболее важных в комплексе задач, решаемых в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов. В данной работе под слежением понимается оценивание координат и размеров объекта в последовательности изображений.

После получения целеуказания на объект требуется выбрать тот или иной метод слежения в зависимости от оценки параметров объекта слежения — скорости движения, размеров, формы, неоднородностей и т. д., которая выполняется либо оператором (при ручном выборе), либо автоматически. Очевидно, что при длительном слежении перечисленные выше характеристики объекта могут значительно изменяться, из-за чего первоначально выбранный метод слежения, зачастую, становится неэффективным. Такие ситуации приводят к срыву слежения. Задача предотвращения такого рода ошибок достаточно актуальна.

Целью данной работы является разработка подхода к решению задачи слежения в условиях значительного изменения размеров объекта с течением времени.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Введем ряд определений. Будем считать, что объект имеет малые размеры, если его площадь относительно всего наблюдаемого изображения не превышает 0,1 % (минимально составляет  $1 \times 1$  элемент разложения); средние размеры, если площадь относительно наблюдаемого изображения составляет от 0,1 до 15 %; большие размеры в иных случаях. Значительными считаются изменения размеров объекта с малых на большие и наоборот на ограниченном временном интервале.

---

**Корепанов Семен Евгеньевич** — научный сотрудник кафедры АИТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru.

**Стротов Валерий Викторович** — доцент кафедры АИТУ, кандидат технических наук, e-mail: aitu@rsreu.ru.

Наблюдаемое изображение  $l(i, j, n)$  на  $n$ -м кадре видеопоследовательности описывается известной моделью заслона [Алпатов и др., 2008]:

$$l(i, j, n) = r(i, j, n)h(i, j, n) + (1 - r(i, j, n))g(i, j, n) + \xi(i, j, n), \quad (i, j) \in R. \quad (1)$$

Здесь  $g(i, j, n)$  — изображение фона,  $h(i, j, n)$  — изображение объекта слежения;  $r(i, j, n)$  — бинарное изображение, единичные точки которого соответствуют точкам объекта, а нулевые — точкам фона;  $\xi(i, j, n)$  — гауссовский белый шум с нулевым средним;  $i, j$  — координаты выбранной точки на изображении;  $R$  — множество точек, на котором задано наблюдаемое изображение.

Изображения объекта могут изменяться со временем, подвергаясь преобразованиям сдвига, поворота и равномерного масштабирования:

$$h(i, j, n) = h_0(T_h(i, j, n)), \quad (2)$$

$$\text{где } T_h(i, j, n) = \begin{pmatrix} \lambda(n)(i \cos \varphi(n) + j \sin \varphi(n) + v_x(n)) \\ \lambda(n)(-i \sin \varphi(n) + j \cos \varphi(n) + v_y(n)) \end{pmatrix}.$$

Изображение фона не подвергается масштабированию с течением времени, его преобразование имеет следующий вид:

$$g(i, j, n) = g_0(T_g(i, j, n)),$$

где

$$T_g(i, j, n) = \begin{pmatrix} i \cos \psi(n) + j \sin \psi(n) + v_x(n) \\ -i \sin \psi(n) + j \cos \psi(n) + v_y(n) \end{pmatrix}.$$

Здесь  $h_0(i, j)$ ,  $g_0(i, j)$  — исходные изображения объекта и фона соответственно,  $v_x(n)$ ,  $v_y(n)$ ,  $v_x(n)$ ,  $v_y(n)$  — параметры смещения по горизонтали и вертикали;  $\varphi(n)$ ,  $\psi(n)$  — поворот наблюдаемого изображения;  $\lambda(n)$  — параметр изменения масштаба. Предполагается, что в начальный момент наблюдения объект должен иметь малые или средние размеры.

Требуется на основе наблюдаемых изображений  $l(i, j, n)$ ,  $n \in N$ , где  $N$  — число кадров видеопоследовательности, получить оценки координат центра объекта  $\hat{i}_c(n)$ ,  $\hat{j}_c(n)$  и размеров объекта  $\hat{\theta}_H(n)$ ,  $\mathcal{M}_W(n)$ .

## ОБЩИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

В настоящее время существует ряд методов, предназначенных для решения задачи слежения. Среди них можно выделить основанные на пространственной фильтрации [Li et al., 1997], пространственно-временной фильтрации [Алпатов, Блохин, 1995], статистической сегментации [Применение..., 1987], согласованной фильтрации [Баклицкий, Бочкарёв, 1986] и структурные методы [Волегов, Юрин, 2009].

Следует заметить, что все эти методы накладывают ограничение на размеры отслеживаемого объекта. Так структурные методы, как правило, предназначены для работы с объектами больших размеров, а пространственные обеспечивают наибольший эффект с объектами малых и средних размеров. Для достижения цели предлагается использовать комплексный подход, заключающийся в использовании наиболее эффективных алгоритмов слежения за объектами, переключения между которыми проходят в зависимости от их размеров.

### АЛГОРИТМ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ МАЛЫХ И СРЕДНИХ РАЗМЕРОВ

Для обнаружения и слежения за объектом малых и средних размеров удобно использовать методы пространственно-временной фильтрации [Алпатов, Бабаян, 2006], для чего нужна информация о геометрических искажениях наблюдаемой последовательности изображений. Ее получение предполагает применение многоэталонного алгоритма с целью оценивания параметров преобразований изображений видеосцены. Этот алгоритм разработан на основе метода корреляционного сопоставления изображений и структурного метода [Стротов, 2008] и включает три этапа.

На первом в течение  $n_1$  кадров происходит оценивание фонового изображения  $g_0(i, j)$  и параметров аддитивного шума  $\xi$ . На втором — алгоритм работает в режиме обнаружения объекта (не менее  $n_2$  кадров). После обнаружения объекта алгоритм переключается (третий этап) в режим слежения за ним. Величины  $n_1, n_2$  определяются характеристиками видеосюжета.

Рассмотрим более подробно второй и третий этапы. Они включают в себя последовательные шаги для выполнения на каждом обрабатываемом кадре.

1. Оцениваются параметры  $v_x(n), v_y(n)$  и  $\psi(n)$  преобразований  $T_g(i, j, n)$  фонового изображения.
2. Выделяются движущиеся объекты на изображении на основе пространственно-временного алгоритма. Оценка бинарной маски наблюдаемого изображения формируется по правилу:

$$\hat{r}(i, j, n) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\hat{g}(i, j, n) - l(i, j, n))^2 > d^2 \hat{\sigma}_\Sigma^2(i, j, n); \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $d = d(p_-)$  — полуширина  $(1 - p_-) \times 100\%$  доверительного интервала для нормированной гауссовой случайной величины;  $p_-$  — заданная вероятность ложного выделения;  $\hat{\sigma}_\Sigma$  — величина, зависящая от оценки дисперсии аддитивного шума и значения градиента.

3. Удаляются сегменты, размеры которых в заданное число раз меньше размеров объекта. Затем проводится разметка и параметризация бинарного изображения [Алпатов и др., 2008]. В результате формируется список сегментов, включающий координаты центра и размеры сегмента.
4. Проводится упрощенная морфологическая обработка, под которой понимается последовательное применение операций закрытия и открытия к изображению, описанному списком сегментов.
5. Выполняется траекторная обработка списков сегментов, основанная на теории графов и теории калмановской фильтрации. В результате формируется новый список сегментов, в котором каждый сегмент описывается идентификатором сегмента, координатами центра  $\hat{i}_c(n), \hat{j}_c(n)$  и размерами сегмента  $\hat{\theta}_H(n), \hat{\theta}_W(n)$ , скоростью сегмента, флагом нахождения сегмента в прогнозе и параметром «время жизни сегмента».
6. В режиме обнаружения поиск объекта проводится на основе скорости движения, времени жизни и флага прогноза. Критерием обнаружения объекта считается максимальное отличие вектора скорости одного из сегментов от средней скорости всех сегментов в течение пяти кадров. При



этом время жизни рассматриваемых сегментов должно быть больше пяти, и сегменты не должны находиться в прогнозе.

В режиме слежения объект выбирается из списка сегментов по идентификатору.

### АЛГОРИТМ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

Для слежения за крупноразмерными объектами используется упомянутый выше многоэталонный алгоритм [Стротов, 2008]. Он состоит из пяти шагов.

1. На исходном изображении объекта выбирается заданное число участков  $s_k$ , называемых опорными. Размеры опорных участков составляют от  $16 \times 16$  до  $32 \times 32$ , количеством не менее 5.
2. Оценивается местоположение опорных участков на наблюдаемом изображении объекта. При этом координаты центров опорных участков определяются с субпиксельной точностью.
3. Оцениваются параметры геометрических преобразований сдвига  $\hat{v}_x(n)$ ,  $\hat{v}_y(n)$ , поворота  $\hat{\phi}(n)$  и изменения масштаба  $\hat{\lambda}(n)$  наблюдаемого изображения.
4. Определяются новые координаты центра изображения наблюдаемого объекта  $\hat{i}_c(n)$ ,  $\hat{j}_c(n)$  и его размеры  $\hat{\theta}_H(n)$ ,  $\hat{\theta}_W(n)$ .
5. Выделяются и перезахватываются опорные участки, непригодные к дальнейшему использованию.

Особенность рассматриваемого алгоритма в том, что опорные участки должны быть выбраны только на изображении объекта, площадь которого может составлять менее четверти от площади наблюдаемого изображения. Поэтому для определения зоны выбора участков используется априорная информация об объекте слежения и фоновом изображении. Выбор опорных участков проводится в выбранной зоне  $M(i, j, n)$  наблюдаемого изображения по критерию:

$$\left( \hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k \right) = \arg \min_{\alpha, \beta \in M(i, j, n)} \left( \frac{1}{\sum_{(i, j) \in S_k} (\Delta_i l(i, j, n))^2} + \frac{1}{\sum_{(i, j) \in S_k} (\Delta_j l(i, j, n))^2} \right) \quad (4)$$

где запись вида  $\Delta_i l$  означает операцию численного дифференцирования изображения  $l$  по координате  $i$ ;  $S_k$  — множество точек  $k$ -го участка  $s_k$ , расположенного в точке с координатами  $(\alpha, \beta)$ .

Оценку  $M(i, j, n)$  предполагается формировать на основе бинарной маски объекта  $\hat{r}(i, j, n_{\text{пер}})$ , полученной от алгоритма выделения движения по формуле:

$$M(i, j, n) = \hat{r} \left( \hat{T}_{h_{\text{пер}}} (i, j, n), n_{\text{пер}} \right),$$

где  $\hat{T}_{h_{\text{пер}}} (i, j, n)$  — оценка преобразований, вычисляемая с момента  $n_{\text{пер}}$  переключения на алгоритм слежения за большими объектами.

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫБОР АЛГОРИТМА СЛЕЖЕНИЯ

Ограничиваясь допущением, что объект в начальный момент имеет малые или средние размеры, первоначальное обнаружение и слежение за ним возлагается на алгоритм на основе пространственно-временной фильтрации.

Если в течение трех кадров размеры объекта становятся большими, то производится переключение на алгоритм слежения за объектами больших размеров. При этом запоминается состояние алгоритма слежения за объектами малых и средних размеров для сохранения возможности возобновления его работы. В момент перехода на многоэталонный алгоритм слежения за объектом больших размеров требуется передать координаты его центра, бинарную маску и размеры.

Обратный переход на алгоритм на основе пространственно-временной фильтрации происходит, если в течение трех кадров оцениваемый масштаб объекта принимает значение меньше 1, т. е. размеры объекта уменьшились по сравнению с размерами, переданными на алгоритм слежения за объектами больших размеров.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки работоспособности и точности разработанного комплексного алгоритма были проведены эксперименты на искусственных и на натуральных сюжетах. Результаты исследований подробно приведены в [Стротов, Корепанов, 2012].

Проведенные исследования показывают, что предлагаемый подход работоспособен. Его применение позволяет в разы увеличить ширину диапазона изменения размеров отслеживаемых объектов по сравнению с известными подходами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен комплексный подход к слежению за объектами со значительно изменяющимися размерами. В рамках этого подхода рассмотрены два алгоритма, предназначенные для слежения за объектами: основанный на принципе выделения движения (для объектов малых и средних размеров) и многоэталонный алгоритм оценки параметров преобразований изображения объекта (для объектов больших размеров). Экспериментально подтверждена работоспособность предложенного подхода.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 16.120.11.242-НШ).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Алпатов и др., 2008] *Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашкин А. И.* Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
- [Алпатов, Бабаян, 2006] *Алпатов Б. А., Бабаян П. В.* Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 45–51.
- [Алпатов, Блохин, 1995] *Алпатов Б. А., Блохин А. Н.* Модели и алгоритмы обнаружения и выделения движущихся фрагментов изображений // Автометрия. 1995. № 4. С. 100–104.

- [Баклицкий, Бочкарёв, 1986] *Баклицкий В. К., Бочкарёв А. М.* Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986. 216 с.
- [Волегов, Юрин, 2009] *Волегов Д. Б., Юрин Д. В.* Упорядочивание изображений для построения по ним 3D-моделей // ГрафиКон'2009: Тр. конф. М., 2009. С. 202–209.
- [Применение..., 1987] Применение методов сегментации изображений в автономных системах обнаружения, распознавания и сопровождения движущихся целей / Под ред. П. А. Бакута // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 3–93.
- [Стротов, 2008] *Стротов В. В.* Оценивание параметров смещения изображения в задачах выделения движущихся объектов // Вестн. Рязанского гос. радиотех. ун-та. 2008. № 23. С. 30–37.
- [Стротов, Корепанов, 2012] *Стротов В. В., Корепанов С. Е.* Слежение за объектом со значительно изменяющимися во времени размерами // Вестн. Рязанского гос. радиотех. ун-та. 2012. № 39. С. 9–14.
- [Li et al., 1997] *Li Biao, Shen ZhenKang, Li JiCheng.* Automatic target detection and tracking system using infrared imagery // Proc. Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE). 1997. V. 3069, Automatic Target Recognition VII. P. 534–540.

## COMPLEX APPROACH FOR OBJECT TRACKING DURING ITS CONSIDERABLE SIZE VARIATION

**S. E. Korepanov, V. V. Strotov**

*Ryazan State Radio Engineering University (RSREU)*

An approach for object tracking during its considerable size variation is proposed. This approach builds on two tracking algorithms combination. First of this algorithms based on spatiotemporal image filtering, second — on correlation and structural methods. Switching between algorithms makes depending on object size, estimated on observed image.

*Keywords:* object tracking, varies considerably size, complex approach, parameter estimation.

---

**Korepanov Semen Evgenievich** — research associate of AITU dept., e-mail: [aitu@rsreu.ru](mailto:aitu@rsreu.ru).  
**Strotov Valery Victorovich** — associated professor of AITU dept., PhD, e-mail: [aitu@rsreu.ru](mailto:aitu@rsreu.ru).

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ

С. А. Кузьмин

*Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП)*

Анализируются проблемы, возникающие при выделении объектов. Предлагаются способы борьбы с этими проблемами. Экспериментально установлена эффективность комбинаций предложенных способов.

*Ключевые слова:* выделение объектов, бинаризация изображений.

### ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое выделение объектов в видеопоследовательностях требуется во многих приложениях. Под выделением будем понимать процесс разделения изображения на области по семантическому значению. Это определение сделано для контраста с определением сегментации — процессом разделения изображения на области по яркости. Цель работы — повышение характеристик алгоритмов выделения движущихся объектов.

### ПРОБЛЕМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим систему видеонаблюдения, работающую в следующих условиях: неподвижная камера, движущиеся объекты, яркость объектов априорно неизвестна, фон квазистатистический.

Общей статистической моделью яркостей пикселей для данных условий будет смесь классов «светлый фон + светлые объекты + темный фон + темные объекты + тени + шум». Требуется отнести каждый пиксел к одному из классов. Границы классов зачастую перекрываются, что после применения классификатора (операции бинаризации) приводит к потере участков искомым объектам и наличию ложно выделенных участков фона. Таким образом, в условиях априорной неопределенности относительно яркости искомым объектам нельзя по одному кадру выделить все объекты при приемлемом уровне ошибок классификации, так как области одинаковой семантики находятся в разных яркостных диапазонах [Кузьмин, 2009].

Отделить движущиеся объекты от фона возможно, если известны модели объектов или модель фона. Однако в случае априорной неопределенности относительно яркости искомым объектам нельзя задать их яркостные эталонные описания, в то время как фоновая составляющая сцены может быть оценена. На основании кадров видеосъемки строится попиксельная модель фона с помощью фильтра Калмана (рис. 1).

Более подробно статистические модели рассмотрены в [Кузьмин, 2012а]. В этой же работе показано, что отличие величин СКО гистограмм изображений межкадровой разности, разности кадра и оценки фона эквивалентно разным условиям наблюдения и применение разности кадра и фона предпочтительнее межкадровой разности.

---

Кузьмин Сергей Александрович — старший преподаватель, e-mail: kuzmin\_serg@list.ru.

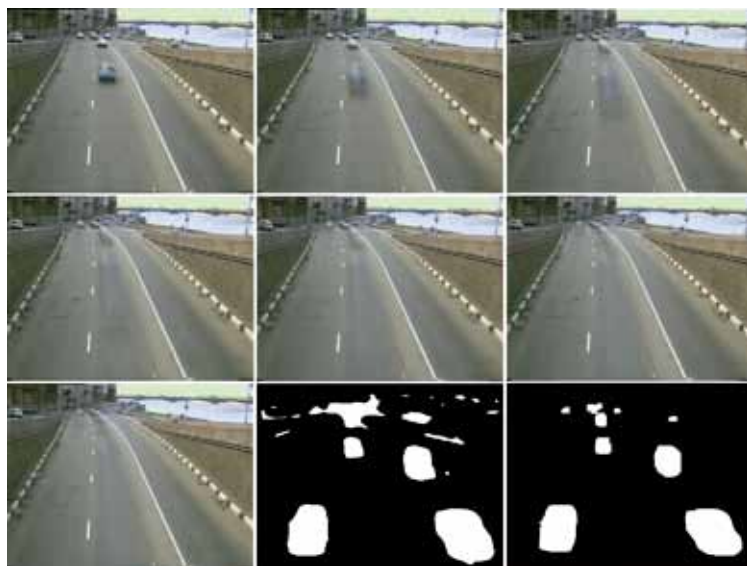


Рис. 1. Построение оценки фона с помощью фильтра Калмана с растущей памятью



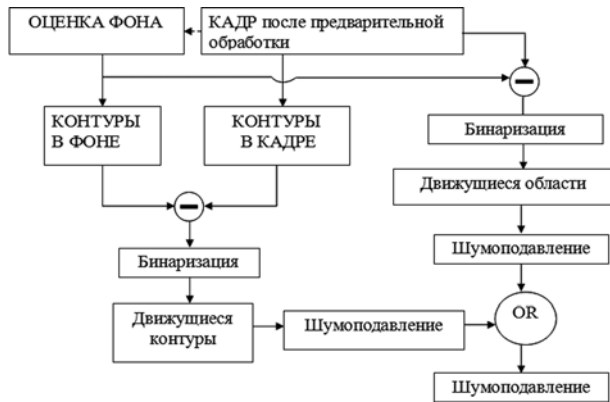
Рис. 2. Недостатки обычных алгоритмов выделения

На основании сравнения кадра с моделью фона возможно выделение движущихся объектов и теней. При применении метода вычитания оценки фона из кадра возникает ряд проблем (рис. 2): 1) ошибки компенсации фона; 2) объекты-призраки; 3) отпечатки фона на объектах; 4) раздробленность объектов; 5) выделение теней вместе с объектами; 6) неправильный порог бинаризации (дыры, помехи). Первые две проблемы связаны с неправильным выбором или некорректной настройкой алгоритмов оценки фона. Из-за особенностей проявления этих дефектов единственным способом борьбы с этими проблемами будет смена настроек или изменение алгоритма оценки фона. Остальные четыре проблемы (с третьей по шестую) связаны с алгоритмами сегментации. С дефектами можно бороться заменой алгоритмов или коррекцией бинарных изображений.

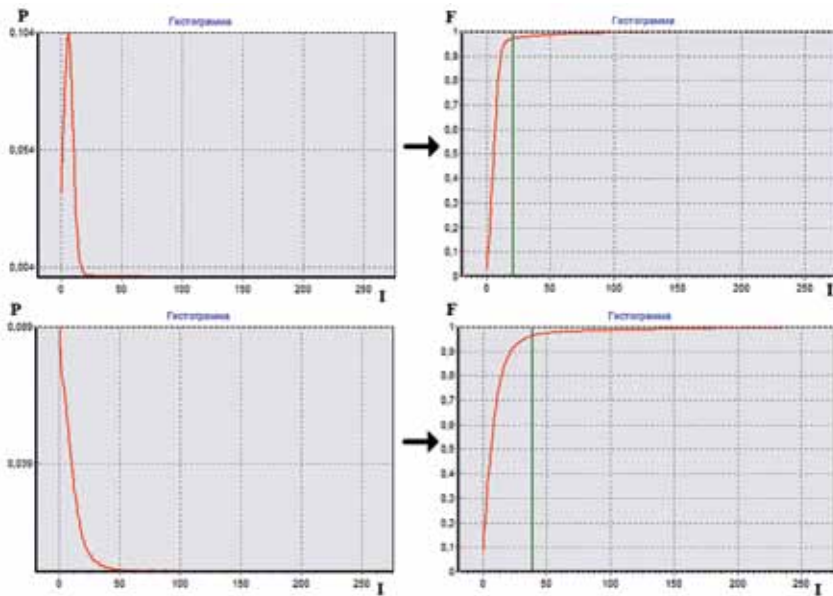
**СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ПРОБЛЕМАМИ**

Для борьбы с проблемой раздробленности частей объектов предложено дополнять выделенные области информацией об их внутренних связях (переходах от одних частей объекта к другим) и границах (внешних контурах). Бинарные препараты «движущихся областей» и «движущихся контуров» объединяются с помощью операции «ИЛИ» (рис. 3).

В качестве алгоритма бинаризации используется собственный алгоритм [Кузьмин, 2009], принцип работы которого похож на критерий каменистой осыпи из факторного анализа (рис. 4). Порог ставится по моменту выхода на горизонтальный участок, поскольку он соответствует высоким уровням яркости разностного изображения — участкам объектов.



**Рис. 3.** Первый способ — объединение движущихся областей и движущихся контуров



**Рис. 4.** Второй способ — адаптивная бинаризация разностных кадров

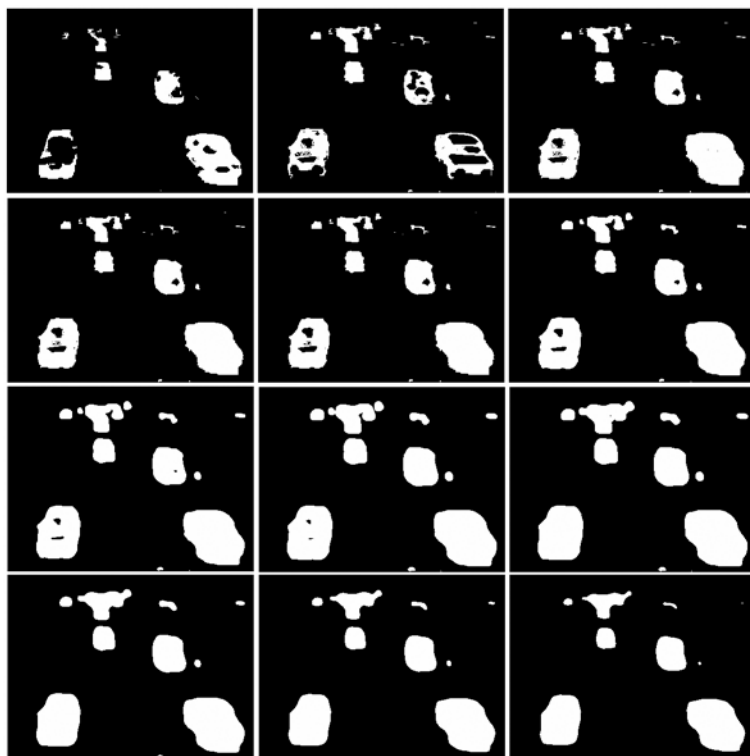


Рис. 5. Третий способ — повышение связности и шумоподавление

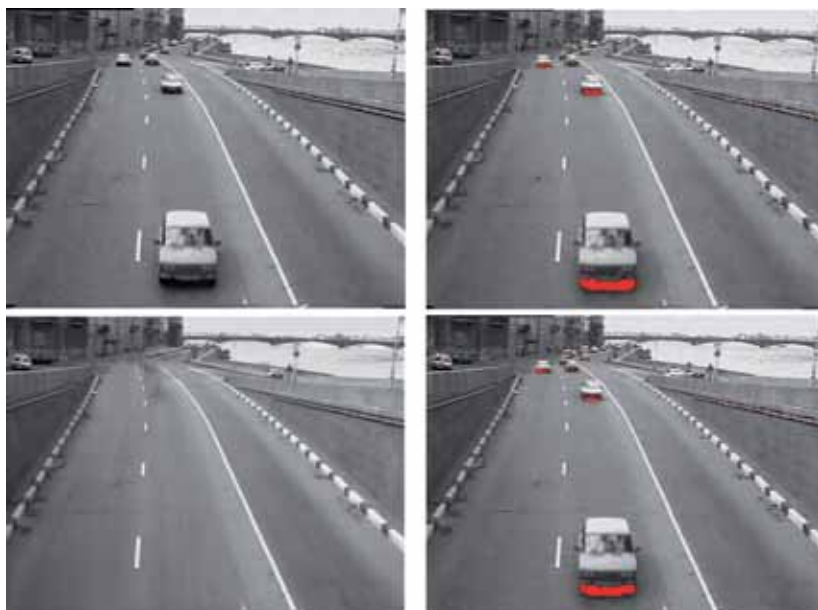


Рис. 6. Четвертый способ — обнаружение теней, показаны результаты работы двух алгоритмов

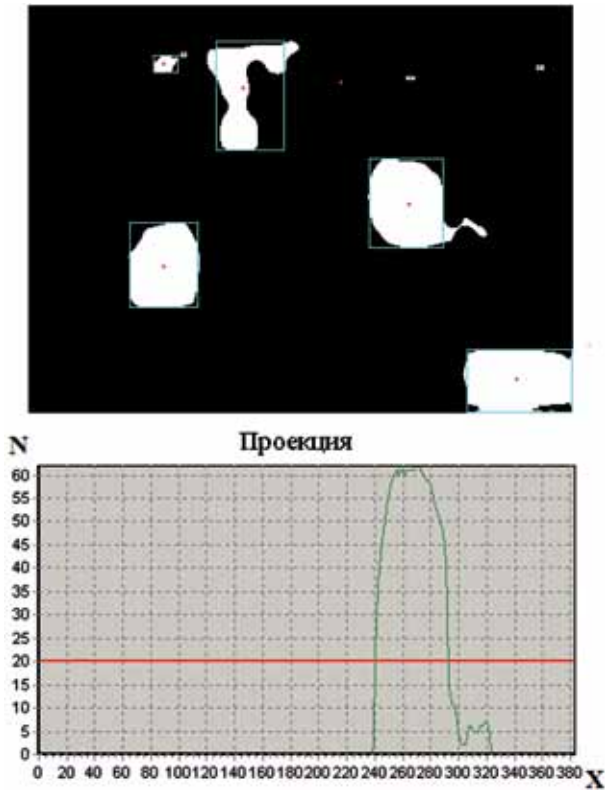


Рис. 7. Четвертый способ — исключение теней из результата выделения

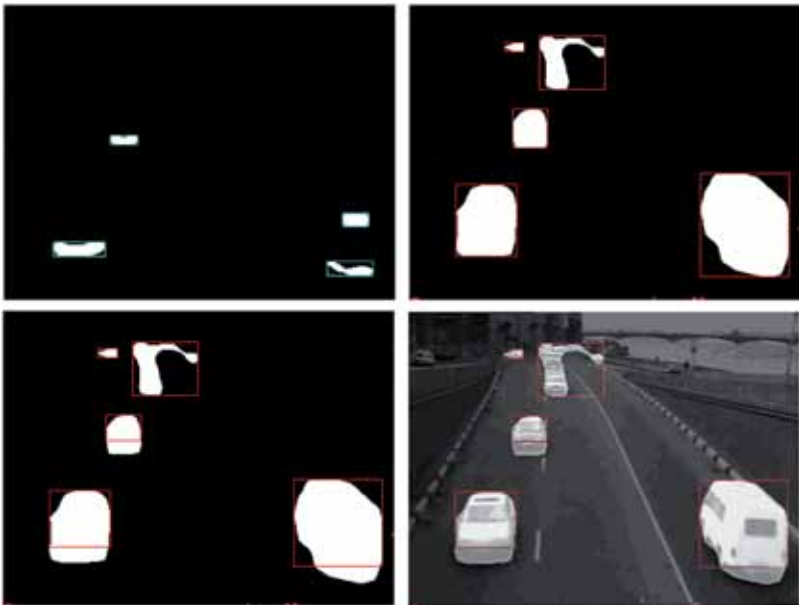


Рис. 8. Четвертый способ — исключение теней из результата выделения



После объединения препаратов следует этап постобработки (рис. 5), на котором повышается связность частей объектов и понижается уровень шума. На рис. 5 верхний ряд слева направо — препараты движущихся областей, движущихся контуров и результат объединения. Последующие ряды показывают эффект от применения каскадов фильтров на основе порядковой статистики [Кузьмин, 2008].

Тени могут быть обнаружены по уменьшению яркости участков текущего кадра относительно яркости оценки фона (рис. 6). Обнаруженные участки теней могут быть использованы для коррекции границ выделенных областей с объектами на изображении динамической составляющей. Разработаны два алгоритма коррекции — первый не использует обнаруженные тени (рис. 7), второй алгоритм их использует (рис. 8). Коррекция границ объектов приводит к более точному определению классов объектов (например, транспортных средств) и сглаживанию траекторий, что снижает также вероятность срывов сопровождения. Более подробно коррекция рассмотрена в [Кузьмин, 2012б].

Приводятся четыре способа борьбы с проблемами 3–6: объединение информации о «движущихся контурах» и «движущихся областях» для борьбы с раздробленностью; адаптивный алгоритм выбора порога бинаризации для борьбы с неправильным выбором порога бинаризации; каскады фильтров на основе порядковой статистики для борьбы с помехами, отпечатками фона на объектах, раздробленностью; коррекция границ областей с объектами для борьбы с неправильным порогом бинаризации и выделением теней вместе с объектами.

Проведено исследование изменения характеристик алгоритмов выделения (вероятности правильного обнаружения пиксела внутри объекта Рпо, вероятности ложного обнаружения пиксела вне объекта Рлт, вероятности ложного пропуска пиксела внутри объекта Рлп) по мере наращивания количества способов путем сравнения с эталоном.

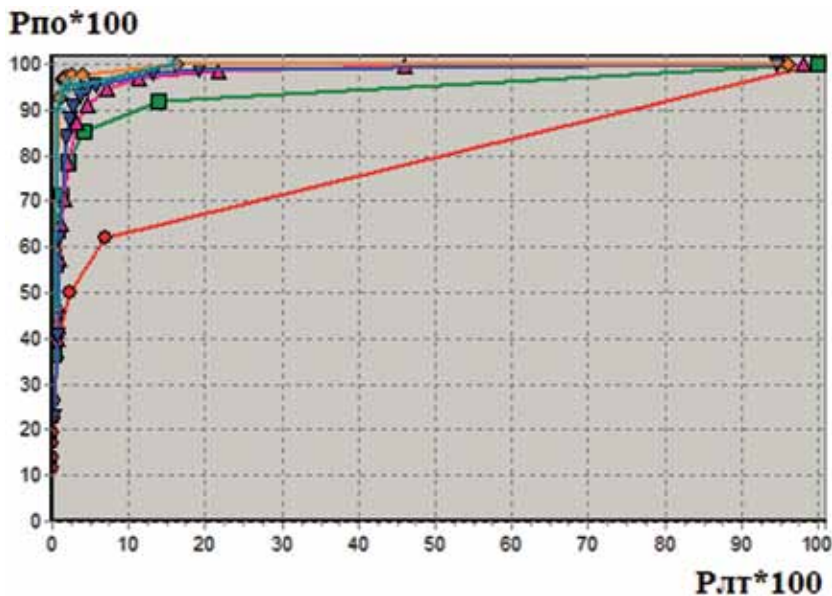


Рис. 9. Характеристики шести алгоритмов выделения: М1 — красный, М2 — зеленый, М3 — фиолетовый, М4 — синий, М5 — оранжевый, М6 — голубой

Сравнивались 6 алгоритмов:

- М1 — межкадровая разница (МКР);
- М2 — разность кадра и оценки фона (РКФ);
- М3 — объединение движущихся контуров (ДК) и движущихся областей (ДО);
- М4 — объединение ДК и ДО + адаптивная бинаризация (АБ);
- М5 — объединение ДК и ДО + АБ+ шумоподавление;
- М6 — объединение ДК и ДО + АБ+ шумоподавление + исключение теней.

Результаты представлены на рис. 9 (вероятности умножены на 100). В таблице показаны характеристики алгоритмов выделения, соответствующие настройке алгоритмов по критерию минимума суммы ложных пропусков и ложных тревог (Рлт + Рлп).

Единственным способом, снижающим характеристики, будет исключение теней, так как обрезаются не только тени, но и части объектов. Но этот способ имеет другие достоинства — повышение вероятности классификации объекта, сглаживание траекторий, снижение вероятности срыва сопровождения.

#### Характеристики алгоритмов выделения

Метод	Рпо	Рлт	Рлп	Рлт + Рлп
М1	0,6208	0,0705	0,3791	0,4496
М2	0,8535	0,0422	0,1465	0,1887
М3	0,9464	0,0723	0,0535	0,1258
М4	0,9454	0,0469	0,0545	0,0992
М5	0,9695	0,0151	0,0305	0,0456
М6	0,9583	0,0224	0,0416	0,0641

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента показывают, что предложенные способы повышают характеристики алгоритмов выделения, снижая количество пропущенных и ложно выделенных пикселей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [Кузьмин, 2008] Кузьмин С.А. Исследование помехоустойчивости ранговых операторов // Докл. 10-й Международ. конф. и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М., 2008. Т. 2. С. 501–504.
- [Кузьмин, 2009] Кузьмин С.А. Алгоритм выбора порога бинаризации для изображения межкадровой разницы // Научная сессия ГУАП: Сб. докл.: В 4 ч. Ч. 2. Технические науки / СПбГУАП. СПб., 2009. С. 54–56.
- [Кузьмин, 2012а] Кузьмин С.А. Сравнительное исследование способов оценки фона в видеопоследовательностях // Журн. радиоэлектроники. 2012. № 3. 15 с. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/mar12/12/text.pdf>.
- [Кузьмин, 2012б] Кузьмин С.А. Устранение влияния теней на точность выделения объектов в видеопоследовательностях // Журн. радиоэлектроники. 2012. № 5. 15 с. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/koi/may12/2/text.html>.

**METHODS FOR IMPROVING ACCURACY OF DETECTION  
OF OBJECTS IN VIDEO SEQUENCES**

**S. A. Kuzmin**

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SPb SUAI)*

Problems, that arise during object detection, are analyzed. Methods to address these problems are proposed. The efficiency of combinations of proposed methods was measured during experiment.

*Keywords:* object detection, image binarization.

---

**Kuzmin Sergey Alexandrovich** — teaching fellow, e-mail: kuzmin\_serg@list.ru.

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВИДЕОСОПРОВОЖДЕНИЯ

**В. С. Муравьев, С. И. Муравьев**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВПО «РГРТУ», РГРТУ)*

Описан алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов, основанный на оценке параметров авторегрессионной модели фона с помощью процедуры адаптивной пространственной фильтрации. На основе такого подхода разрабатывается модифицированный вариант алгоритма. Приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* воздушный объект, обнаружение, выделение, адаптивная фильтрация, авторегрессионная модель фона.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия комплексы обработки изображений реального времени активно применяются в составе систем автоматического сопровождения воздушных объектов, наблюдаемых на фоне ясного или облачного неба, с целью решения задач их обнаружения и оценки параметров. В качестве объектов интереса могут выступать самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты, ракеты. Ранее для этих целей использовались преимущественно радиолокационные станции (РЛС). Однако им свойственны существенные недостатки, что требует поиска и внедрения новых подходов. Преодолеть многие проблемы возможно путем использования современных телевизионных и тепловизионных датчиков для получения изображения объекта с последующей компьютерной обработкой и анализом видеoinформации.

В работе [Yilmaz et al., 2003] рассматриваются алгоритмы, позволяющие обнаруживать малоразмерные воздушные объекты, однако они преимущественно ориентированы на обработку изображений, получаемых с тепловизионных датчиков, и часто не способны эффективно обнаруживать протяженные объекты. Представленные в книге [Алпатов и др., 2008] алгоритмы обнаружения ориентированы на использование предварительной процедуры компенсации геометрических искажений изображений, вызванных смещением поля зрения видеодатчика. Однако при наблюдении объектов на относительно однородном фоне возникает проблема оценивания параметров геометрических преобразований с требуемой точностью. Таким образом, разработка эффективных алгоритмов выделения, обнаружения и оценки параметров воздушных объектов до настоящего времени остается весьма актуальной задачей.

---

**Муравьев Вадим Сергеевич** — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: aitu@rsreu.ru.

**Муравьев Сергей Иванович** — доцент, кандидат технических наук, доцент, e-mail: aitu@rsreu.ru.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве модели формирования изображения, получаемого с помощью видеодатчика, можно использовать пространственно-временную модель, описанную в статье [Алпатов и др., 2010]. Будем рассматривать только пространственную информацию, тогда, опуская номер кадра, данную модель можно записать в следующем виде:

$$l(i, j) = h(i, j)r(i, j) + g(i, j)(1 - r(i, j)) + \xi(i, j), \quad i = \overline{0, N_x - 1}, \quad j = \overline{0, N_y - 1}, \quad (1)$$

где  $N_x, N_y$  — высота и ширина кадра;  $l(i, j)$  — наблюдаемое изображение;  $g(i, j)$  и  $h(i, j)$  — неизвестные функции, значения которых являются яркостями точек фона и объекта соответственно;  $\xi(i, j) \approx N\left(0, \sigma_\xi^2\right)$  — шум видеодатчика. Функция  $r(i, j)$ , которая определяет расположение объекта на изображении, задается правилом:

$$r(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если в точке } (i, j) \text{ кадра находится объект,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Задача *выделения* объектов заключается в оценке  $\hat{r}(i, j)$  по наблюдаемому изображению  $l(i, j)$ . Этап выделения объектов, как правило, предшествует этапу *обнаружения* объектов — принятию решения о присутствии или отсутствии объекта на изображении  $l(i, j)$ .

При наблюдении воздушных объектов в качестве фоновой составляющей может рассматриваться облачное небо с плавными переходами яркости [Муравьев, Муравьев, 2011]. Для описания подобного фона предлагается использовать авторегрессионную модель (АР-модель) следующего вида:

$$g(i, j) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{\substack{m=0 \\ (n,m) \neq (0,0)}}^{L-1} a(n, m) g(i-n, j-m) + \eta(i, j), \quad (3)$$

где  $a(n, m)$  — коэффициенты авторегрессии;  $\eta(i, j)$  — ненаблюдаемый белый формирующий шум с нулевым математическим ожиданием, величина  $L$  определяет порядок модели. Для принятия решения о наличии объектов в кадре необходимо компенсировать фон, что в свою очередь предполагает оценку параметров  $a(n, m)$ . В ситуациях, характеризующихся априорной неопределенностью и пространственной изменчивостью наблюдаемых изображений, целесообразно использовать адаптивные методы обработки информации, в которых осуществляется автоматическая оптимизация параметров и структуры алгоритма относительно текущих характеристик фона.

## АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

В работах [Марпл, 1990; Nolibe et al., 1996] описана возможность применения адаптивного метода наименьших средних квадратов для оценки параметров АР-модели фона. Такой подход послужил основой для предлагаемого в данной работе алгоритма. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 1.

Значение каждого пиксела отфильтрованного изображения  $d(i, j)$  вычисляется по выражению:

$$d(i, j) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{\substack{m=0 \\ (n,m) \neq (0,0)}}^{L-1} \hat{a}_s(n, m) l(i-n, j-m), \quad i = \overline{0, N_x - 1}, \quad j = \overline{0, N_y - 1}, \quad (4)$$

где  $\hat{a}_s(n, m)$  — оценки АР-коэффициентов, вычисленные на  $s$ -м шаге;  $s = i(N_y - 1) + j$ . Результатом работы алгоритма будет некоторое бинарное изображение, получаемое по правилу:

$$\hat{r}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } |e(i, j)| > T_{s-1}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где  $e(i, j) = l(i, j) - d(i, j)$  — ошибка фильтрации;  $T_{s-1}$  — пороговое значение, вычисленное на шаге  $s-1$ .

На основе  $e(i, j)$  на каждом шаге  $s$  сформируем значение ошибки адаптации  $e_a(i, j)$ . За ошибку адаптации  $e_a(i, j)$  принимается значение  $e(i, j)$  при  $\hat{r}(i, j) = 0$ , т. е. в случае отнесения элемента  $(i, j)$  к фону. Величина  $e_a$  фиксируется при переходе от  $\hat{r} = 0$  к значению  $\hat{r} = 1$ . Следует ожидать, что среднее значение ошибки при использовании процедуры адаптации фильтра будет близко к нулю. Тогда порог  $T_s$  можно выбрать в соответствии с выражением:

$$T_s = k\sigma_s, \quad (6)$$

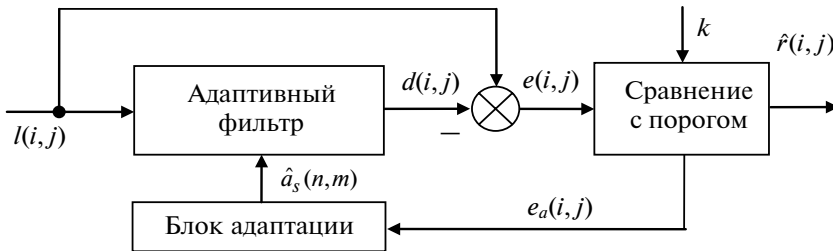


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

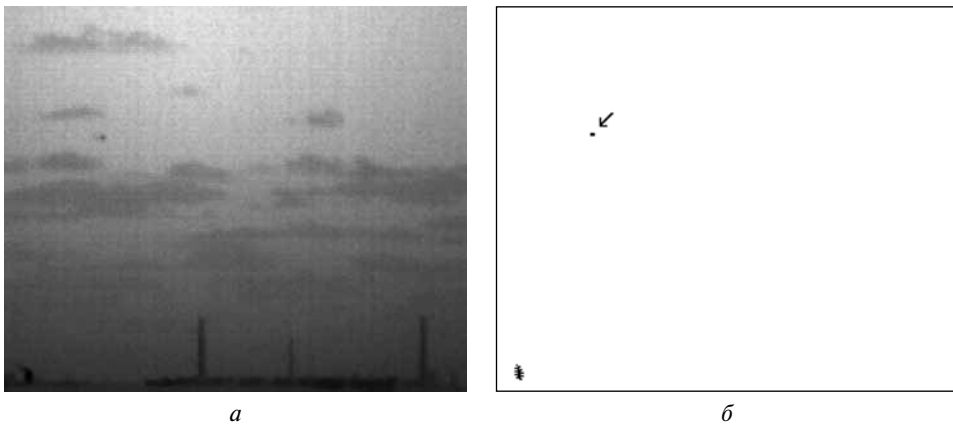


Рис. 2. Пример: *a* — исходное изображение; *б* — инвертированное бинарное изображение

где  $\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{s} \left( (s-1)\sigma_{s-1}^2 + e_a^2(i, j) \right)}$  — СКО ошибки адаптации на шаге  $s$ ;  $k$  — некоторый пороговый коэффициент. В блоке адаптации на основе  $e_a(i, j)$  рекуррентно уточняется весовая функция  $\hat{a}_s(n, m)$ ,  $n, m = 0, L-1$ ,  $(n, m) \neq (0, 0)$  двумерного фильтра в соответствии с выражением

$$\hat{a}_{s+1}(n, m) = \hat{a}_s(n, m) + 2\mu e_a(i, j) l(i-n, j-m), \quad (7)$$

где  $\mu$  — коэффициент сходимости. Вместо последовательного построения обхода изображения маской фильтра  $\hat{a}_s(n, m)$  на практике целесообразным представляется выбор направления обхода «змейкой» [Муравьев, Муравьев, 2011].

Во многих случаях получаемые бинарные изображения содержат элементы, ложно отнесенные к объектам. Для удаления этих ложных образований применяется морфологическая обработка, заключающаяся в последовательном применении процедур морфологического закрытия и открытия с квадратным структурирующим элементом. Пример исходного и инвертированного бинарного изображений приведен на рис. 2. Исходя из найденных параметров сегментов и имеющейся априорной информации, принимается решение об обнаружении объектов в кадре.

Необходимо отметить, что в общем случае наблюдаемый фон может описываться более сложной авторегрессионной моделью скользящего среднего (АРСС), которую можно представить в виде:

$$g(i, j) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} a_{i,j}(n, m) g(i-n, j-m) + \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} b_{i,j}(n, m) \zeta(i-n, j-m), \quad (8)$$

$(n, m) \neq (0, 0)$

где  $\zeta(i, j)$  — некоторый белый шум с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_\zeta^2$ ,  $b_{i,j}(n, m)$  — параметры скользящего среднего.

С целью существенного снижения вычислительных затрат для получения оценок АРСС-параметров могут применяться субоптимальные процедуры, в большинстве из которых оценки АР- и СС-параметров получаются отдельно [Марпл, 1990]. Вначале вычисляются АР-параметры, а затем эти оценки используются для построения некоторого фильтра, который будет применен к исходным данным. Остаточная ошибка на выходе фильтра описывается процессом скользящего среднего, к которому может быть применена процедура оценивания СС-параметров. СС-параметры можно определить исходя из некоторой эквивалентной АР-модели бесконечного порядка. На практике порядок модели  $M$  часто ограничивают таким, что  $M \gg L$ .

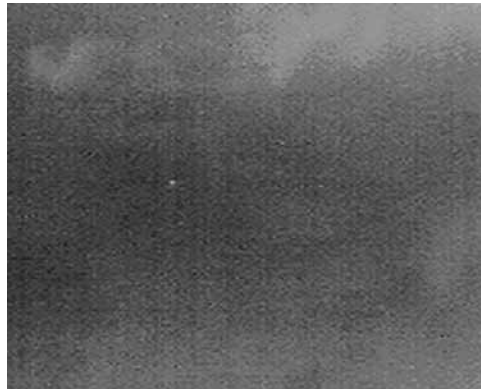
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проводились исследования модифицированного варианта алгоритма с использованием естественных видеопоследовательностей продолжительностью до 1000 кадров, снятых в ТВ- и ИК-диапазонах. Характерные кадры из двух тестовых видеосюжетов приведены на рис. 3.

С целью оценки точности выделения объектов для сюжета № 1 в работе использовались кривые зависимости частоты правильного выделения точек изображения  $P_{пв}$  от частоты ложного выделения точек изображения  $P_{лв}$  (рис. 4а).



Кадр из сюжета № 1



Кадр из сюжета № 2

Рис. 3. Кадры из тестовых видеосюжетов

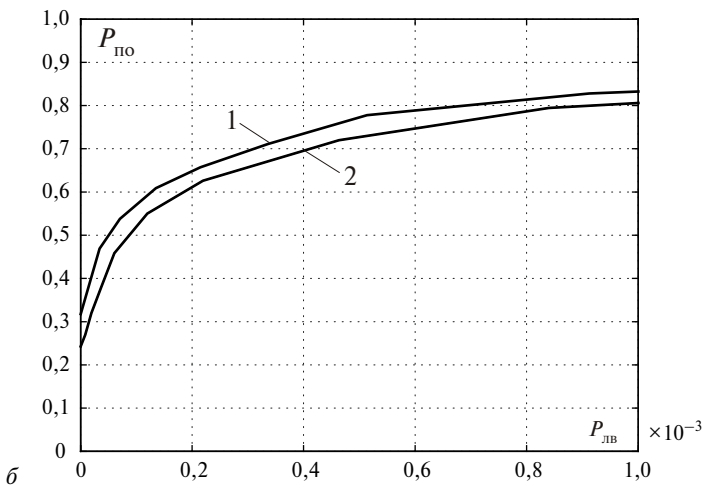
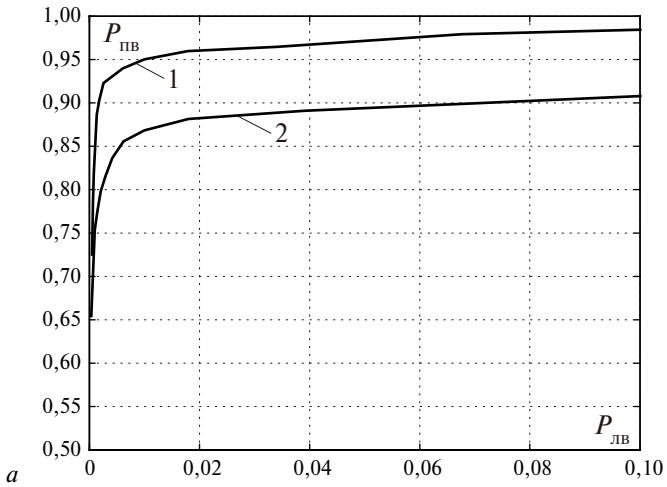


Рис. 4. Графики зависимостей:  $a - P_{ПВ} = f(P_{ЛВ})$ ;  $б - P_{ПО} = f(P_{ЛВ})$



Под частотой правильного выделения  $P_{пв}$  понималось соотношение числа точек, правильно отнесенных к объекту, к общему количеству точек объекта. Частота ложных тревог  $P_{лв}$  вычислялась как соотношение количества точек, неверно отнесенных к объекту, к общему количеству точек изображения, не принадлежащих объекту. Кривая 1 получена для алгоритма с адаптивной фильтрацией, кривая 2 — для алгоритма, предложенного в работе [Алпатов и др., 2010]. Суть предложенного ранее подхода состояла в применении параллельной двумерной фильтрации наблюдаемого изображения двумя фильтрами с масками разного вида и размерности, подстройки размерности маски фильтра для лучшего обнаружения интересующего объекта и сравнения обработанного изображения с глобальным порогом. Для каждого сюжета параметры используемого для сравнения алгоритма выбирались наилучшими с точки зрения получаемых характеристик. Из анализа приведенных графиков видно, что рост  $P_{пв}$  при фиксированном значении  $P_{лв}$  составил до 10 % по сравнению с разработанным ранее алгоритмом.

Для сюжета № 2, содержащего малоразмерный объект, был использован другой подход к количественной оценке характеристик разработанного алгоритма. Оценивалась вероятность ложного выделения  $P_{лв}$  точек объекта, и рассчитывалась частота правильного обнаружения  $P_{по}$ . При этом объект считался обнаруженным, если координаты центра сегмента отличались от эталонных меньше чем на один элемент разложения по каждой координате. Построенные зависимости  $P_{по} = f(P_{лв})$  для видеосюжета № 2 представлены на рис. 4б. Из графиков видно, что результаты применения адаптивного подхода также несколько лучше.

Анализ полученных результатов моделирования и сравнительных исследований позволяет сделать вывод о возможности использования рассмотренного алгоритма при работе с реальными видеопоследовательностями, содержащими облачный фон.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 16.740.11.0519).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Алпатов и др., 2008] Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степанкин А. И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М., 2008. 176 с.
- [Алпатов и др., 2010] Алпатов Б. А., Блохин А. Н., Муравьев В. С. Алгоритм обработки изображений для систем автоматического сопровождения воздушных объектов // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 4. С. 12–17.
- [Марпл, 1990] Марпл С. Л. мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М., 1990. 584 с.
- [Муравьев, Муравьев, 2011] Муравьев В. С., Муравьев С. И. Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов на изображениях // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 8–14.
- [Nolibe et al., 1996] Nolibe L., Borgnino J., Ducoulombier M., Artaud M. Adaptive multispectral detection of small target using spatial and spectral convergence factor // Signal and data processing of small targets: Proc. SPIE. 1996. V. 2759. P. 111–120.
- [Yilmaz et al., 2003] Yilmaz A., Shafique K., Shah M. Target tracking in airborne forward looking infrared imagery // Image and Vision Computing. 2003. N. 21. P. 623–635.

**ADAPTIVE AERIAL OBJECT EXTRACTION AND DETECTION  
ALGORITHM FOR AUTOMATIC TARGET TRACKING SYSTEMS**

**V. S. Muraviev., S. I. Muraviev**

*Ryazan State Radio Engineering University (RSREU), Ryazan*

In this paper the aerial object extraction and detection algorithm is introduced. The idea of the approach is based on estimation of the autoregressive background model parameters with adaptive spatial filtering technique. Authors also presented the modified version of the algorithm. The efficiency of the proposed algorithm is confirmed by the results of experimental research carried on real video data.

*Keywords:* aerial object, detection, extraction, adaptive filtering, autoregressive background model.

---

**Vadim Muraviev** — senior researcher, candidate of technical sciences, e-mail: [aitu@rsreu.ru](mailto:aitu@rsreu.ru).

**Sergey Muraviev** — assistant professor, candidate of technical sciences, e-mail: [aitu@rsreu.ru](mailto:aitu@rsreu.ru).

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СОПОСТАВЛЕНИЙ НА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ

М. Н. Фаворская, И. В. Тупицын

*Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. М. Ф. Решетнева (СибГАУ), Красноярск*

Разработан метод сопоставления точечных особенностей на стереоизображениях, устойчивый к проективным искажениям. Метод основан на нахождении направления и длины обобщенного вектора по окрестности точечной особенности. Повышение устойчивости сопоставлений достигается за счет нового алгоритма вычисления оценок попадания точек в массив достоверных соответствий.

*Ключевые слова:* стереоизображения, точечные особенности, проективные искажения.

### ВВЕДЕНИЕ

Поиск соответствующих точек на изображениях — фундаментальная задача в таких областях, как построение корреляционно-экстремальных систем навигации и систем наведения по изображениям целей, обработка космических и аэрофотоснимков (фотограмметрия, картография, экологический мониторинг земной поверхности), создание систем технического зрения. В качестве исходных могут выступать стереопары или совокупность последовательных кадров.

Обычно методы поиска и оценки соответствий на стереопарах включают три этапа: нахождение точечных особенностей, углов, пересечений и областей на изображении; составление вектора признаков особенностей, который должен быть устойчивым к шуму, геометрическим искажениям и изменениям освещенности; оценка соответствия изображений.

Задача поиска соответствий выполняется, как правило, при упрощающих предположениях с использованием евклидовой метрики или вычислением расстояний Махаланобиса. Обычно в качестве моделей изображения и шума берутся нормальные случайные поля. Однако такое допущение не всегда обосновано, поскольку локальная статистика даже в пределах одного кадра вариабельна. Практическое использование таких оценок ограничено модельными сценами, обработка в режиме реального времени невозможна.

Другим подходом может быть использование матрицы Гессе вторых производных от функции яркости фрагмента изображения [Вау et al., 2008]. Пусть на изображении  $I$  задана точка  $P$  с координатами  $(x, y)$ . Тогда матрица Гессе  $H(P, \sigma)$  в точке  $P$  с учетом среднеквадратического отклонения  $\sigma$  определяется как

$$H(P, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(P, \sigma) & L_{xy}(P, \sigma) \\ L_{yx}(P, \sigma) & L_{yy}(P, \sigma) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $L_{xx}(P, \sigma)$  — свертка второй производной Гауссиана  $g(P)$  с изображением  $I_P$  в точке  $P$ :

$$L_{xx}(P, \sigma) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} g(P) * I_P. \quad (2)$$

---

**Фаворская Маргарита Николаевна** — заведующая кафедрой, доктор технических наук, профессор, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

**Тупицын Илья Владимирович** — аспирант, e-mail: toupitsyn@sibsau.ru.

Аналогично выражению (2) вычисляются остальные элементы матрицы (1). При этом вводится неявное предположение об изотропности и некоррелированности шумов по обеим координатам. Вычисление матрицы Гессе выполняется для каждого пиксела и требует существенных вычислительных ресурсов. Однако шум на изображениях, как правило, не является изотропным (в частности, при перспективных искажениях). Также в качестве критериальной функции соответствия будем использовать не производные яркости изображения, а локальные структуры (например, точечные особенности [Фаворская, Шилов, 2008]).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Введем понятия точечной особенности, следа точечной особенности и соответствия особенностей. Точечной называется такая особенность  $P_o$ , чья окрестность отличается от окрестностей близлежащих точек  $P_i$  на некоторую величину  $\varepsilon$ . При этом функция близости окрестностей по некоторой мере  $\rho(\Omega_{P_i}, \Omega_{P_o}) > \varepsilon$ , где  $\Omega$  — окрестность точки. Пусть задана последовательность положений точечной особенности  $\{P_o^i\}$ ,  $i = n_b, n_e$ , где  $i$  — номер кадра;  $n_b, n_e$  — начальный и конечный кадры соответственно, на которых обнаружена точечная особенность. Такая последовательность положений называется следом точечной особенности. След точечной особенности считается корректным, если существует совокупность проекций некоторой точки сцены на набор кадров исходной последовательности. Соответствием (matching) называется пара точек  $P_i, P_{i+1}$  на изображениях  $I_j, I_{j+1}$ , которые соответствуют одной и той же точечной особенности  $P_o$ . В общем случае любая пара точек из следа точечной особенности считается соответствием. Соответствие  $(P_i, P_{i+1})$  корректно, если существует точка трехмерной сцены, проекциями которой будут точки  $(P_i, P_{i+1})$ .

Существуют два основных подхода поиска соответствий на изображениях. Первый основан на методах сопоставления точечных особенностей. В простейшем случае используется метод последовательного перебора всех возможных пар особенностей  $P_i, P_{i+1}$  на изображениях  $I_j, I_{j+1}$  для поиска наиболее близких (в смысле выбранной метрики). Второй подход использует отслеживание, когда для каждой точечной особенности  $P_i$  изображения  $I_j$  на изображении  $I_{j+1}$  ищется точка  $P_{i+1}$ , наиболее близкая к точке  $P_i$  в соответствии с выбранной метрикой. Обычно для поиска точки  $P_{i+1}$  используется алгоритм Лукаса — Канаде, в основу которого положен итеративный алгоритм на основе метода градиентного спуска. Понятно, что для поиска соответствий на стереопаре целесообразно применение первого подхода, так как количество изображений ограничено двумя изображениями, полученными как с калиброванной, так и с неоткалиброванной видеокамеры в общем случае. Усовершенствуем метод поиска точечных особенностей на стереопаре, который позволит быстрее находить соответствия на имеющихся снимках.

### УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ПОИСКА ТОЧЕЧНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Предлагаемый метод поиска точечных особенностей на стереопарах можно разделить на два этапа. На первом проводится извлечение и сопоставление точечных особенностей, второй этап предназначен для повышения устойчивости выявленных сопоставлений.

### Извлечение и сопоставление точечных особенностей

Алгоритм SURF (Speed Up Robust Features) основан на использовании интегральных изображений и вычислении взвешенного определителя матрицы Гессе [Bay et al., 2008]. При построении дескриптора точечных особенностей применяются двумерные вейвлеты Хаара. Основным преимуществом алгоритма SURF считается быстрота работы в сочетании с инвариантностью к масштабу и вращению изображения, а также к небольшим изменениям освещения. Поскольку изображения, полученные неоткалиброванными камерами, имеют проективные искажения, для сопоставления точечных особенностей требуются методы, устойчивые к ним.

Пусть точечные особенности определены одним из известных способов [Фаворская, Шилов, 2008]. Для достижения устойчивости вычислим направление градиента  $(G_x, G_y)$  в окрестности  $\Omega$  особой точки размером  $(2k + 1) \times (2k + 1)$  пиксел, используя оператор Собела:

$$G_x = \frac{\partial I}{\partial x} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \frac{\partial I}{\partial y} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Однако этот оператор применяется не непосредственно к исходному изображению, а к его Гауссиану  $G_\Sigma$ :

$$G_x^\Sigma = G_\Sigma * \frac{\partial I}{\partial x}, \quad G_y^\Sigma = G_\Sigma * \frac{\partial I}{\partial y}. \quad (4)$$

Чем больше окрестность особой точки, тем точнее вычисляется направление градиента, но при этом затрачивается больше вычислительных ресурсов. Фильтр Гаусса применяется для устранения посторонних шумов на изображении и снижения влияния мелких деталей изображения на вычисление общего направления. Тогда направление и длина вектора градиента в любой точке окрестности вычисляется как:

$$\Theta = \arctan \left( \frac{G_x^\Sigma}{G_y^\Sigma} \right), \quad G = \sqrt{(G_x^\Sigma)^2 + (G_y^\Sigma)^2}. \quad (5)$$

Используя выражение (5), найдем направление и длину обобщенного вектора по всей окрестности точечной особенности как сумму направлений  $\Theta_{mean}$  и длин векторов  $G_{mean}$  градиентов во всех точках окрестности  $k$ , отнесенную к количеству точек:

$$\Theta_{mean} = \frac{\sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k \Theta(x_0 + i, y_0 + j)}{(2k + 1)^2 - b}, \quad G_{mean} = \frac{\sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k G(x_0 + i, y_0 + j)}{(2k + 1)^2 - b}, \quad (6)$$

где  $(x_0, y_0)$  — координаты точечной особенности,  $b$  — количество «плохих» точек окрестности, т. е. точек, в которых значения  $G_x, G_y$  равны нулю.

Помимо направления обобщенного вектора по окрестности точечной особенности вычислим направления в окрестностях точек  $P_1, P_2$ , координаты  $(x, y)$  которых равны:

$$\begin{aligned} x &= s * \cos(\Theta + \alpha) + x_0, \\ y &= s * \sin(\Theta + \alpha) + y_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\Theta$  — направление;  $\alpha$  — угол поворота;  $s$  — величина шага. Для окрестности точки  $P_1$  угол  $\alpha$  равен  $\alpha = \pi/2$ , для окрестности точки  $P_2$  —  $\alpha = 3\pi/2$ .

Вычисление направления градиента в окрестности точечной особенности позволяет добиться устойчивости дескриптора к повороту, а вычисление двух дополнительных направлений требуется для достижения устойчивости к проективным преобразованиям.

Следующий этап вычисления дескриптора — приведение четырехугольной области, вершины которой — начало и концы дополнительных векторов, к прямоугольному виду и заданному размеру. Таким образом, получаются два выровненных сегмента изображения на левом  $L$  и правом  $R$  изображениях. Сравнение полученных областей проводится с помощью нормализованной кросскорреляции  $NCC$ :

$$NCC = \frac{\sum_{i=0}^{2k+1} \sum_{j=0}^{2k+1} L(i, j) R(i, j)}{\sqrt{\left( \sum_{j=0}^{2k+1} L(i, j) \right)^2 \left( \sum_{j=0}^{2k+1} R(i, j) \right)^2}} \quad (8)$$

Для сопоставления всех найденных точечных особенностей строится матрица похожести размерностью  $N \times M$ , где  $N$  — количество точечных особенностей левого изображения;  $M$  — количество точечных особенностей правого изображения. Элементы матрицы представляют собой результат вычисления функции нормализованной кросскорреляции (8). При этом минимальные элементы матрицы будут соответствовать наиболее похожим особым точкам.

Примем, что особая точка на одном изображении соответствует только одной особой точке на другом изображении. Тогда алгоритм сопоставления точечных особенностей будет следующим:

- шаг первый — вычисление матрицы похожести;
- шаг второй — вычисление максимального элемента матрицы;
- шаг третий — поиск минимального элемента матрицы;
- если минимальный элемент равен максимальному элементу, тогда алгоритм прекращает свою работу,
- если значение минимального элемента меньше максимального, выполняется переход к шагу 4;
- шаг четвертый — поставить в соответствие точки из множества дескрипторов особых точек с номерами, соответствующими номерам строки и столбца минимального элемента;
- шаг пятый — установить значения элементов строки и столбца матрицы равными максимальному элементу и перейти к шагу 3.

### Повышение устойчивости сопоставлений

Предлагается новый алгоритм оценки попадания точки в массив достоверных соответствий. В качестве модели используется аффинная модель и свойство аффинного преобразования, заключающееся в постоянном коэффициенте соотношения областей интереса.

Разделим изображения стереопары на отдельные области с помощью сетки заданного размера, например 25 % от ширины и высоты изображения. Таким

образом, изображение делится на 16 областей  $F$ , в каждой из которых случайным образом выбирается четыре соответствующие точки. Выбранные соответствия используются для построения четырех треугольных областей. Обозначим область на левом изображении как  $A_i$ , на правом как  $A'_i$ . Для каждой пары из полученных треугольников вычислим соотношение:

$$ratio_i = \frac{A_i}{A'_i}, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (9)$$

Нормализация соотношений вида (9) производится путем их деления на максимальное значение из четырех для каждой из 16 областей:

$$\overline{ratio}_i = \frac{ratio_i}{\max(RATIO)}, \quad RATIO = \{ratio_1, ratio_2, ratio_3, ratio_4\}, \quad (10)$$

в результате чего итоговая величина соотношения  $ratio_F$  по области  $F$  будет определена как

$$ratio_F = \max(\overline{RATIO}) - \min(\overline{RATIO}), \quad \overline{RATIO} = \{\overline{ratio}_1, \overline{ratio}_2, \overline{ratio}_3, \overline{ratio}_4\}. \quad (11)$$

Если значение  $ratio_F$  меньше некоторого заданного значения  $\epsilon$ , все точки выбранного региона помечаются как достоверные особенности. В противном случае точечные особенности считаются недостоверными. Таким образом, наиболее достоверная модель определяется по наибольшему количеству достоверных точек.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для тестирования разработанного метода была использована как тестовая база стереопар [Scharstein, Pal, 2007], так и собственный видеоматериал, полученный от откалиброванных видеокамер. Все изображения условно разделены на три группы: простые сцены, сцены средней сложности и сильно текстурированные. Из таблицы видно, что экспериментальные результаты для простых сцен и сцен средней сложности хорошие. Однако при этом предлагаемый метод работает на 20 % быстрее, чем при последовательном переборе. Обработка сильно текстурированных сцен дает худшие результаты, но время работы сокращается до 30 % по сравнению с методом последовательного перебора.

### Экспериментальные результаты поиска точечных особенностей

Сцены	Методы					
	Метод последовательного перебора			Предлагаемый метод		
	Правильные соответствия, %	Ложные соответствия, %	Условные операции, тыс. операций	Правильные соответствия, %	Ложные соответствия, %	Условные операции, тыс. операций
Простые сцены	76,4	23,6	128–352	92,11	7,89	110–260
Сцены средней сложности	75,72	24,28	368–490	90,4	9,6	275–410
Сложные сцены	69,93	30,07	496–757	88,57	11,43	425–645

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый метод поиска соответствующих точек на стереопарах повышает устойчивость сопоставления, сохраняя при этом быстродействие метода, основанного на алгоритме SURF. Экспериментальные результаты подтверждают работоспособность метода. Его быстродействие увеличивается на 20...25% по сравнению с методом последовательного перебора, не ухудшая качества сопоставления точечных особенностей.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Фаворская, Шилов, 2008] *Фаворская М. Н., Шилов А. С.* Алгоритмы реализации оценки движения в системах видеонаблюдения // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3(33). С. 408–412.
- [Bay et al., 2008] *Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.* Speeded-Up Robust Features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding. 2008. V. 110. P. 346–359.
- [Scharstein, Pal, 2007] *Scharstein D., Pal C.* Learning conditional random fields for stereo // Computer Vision and Pattern Recognition. 2007. P. 1–8.

## IMPROVING ROBUST METHOD OF FEATURE POINTS CORRESPONDENCES ON STEREO IMAGES

**M. N. Favorskaya, I. V. Toupitsyn**

*Siberian State Aerospace University after academician M. F. Reshetnev  
(SibSAU), Krasnoyarsk*

The improving method of feature points' correspondence on stereo images which is robust to projective distortion had developed. The method is based on computation of direction and length of generalized vector in a neighborhood of a feature point. The improving of robust correspondences is achieved by a novel estimation algorithm of feature points' inclusion in array of valid correspondences.

*Keywords:* stereo images, feature points, projective distortion.

---

**Favorskaya Margarita Nikolaevna** — head of department, doctor of technical science, professor, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

**Toupitsyn Ilya Vladimirovich** — PhD-student, e-mail: toupitsyn@sibsau.ru.



## УЛУЧШЕНИЕ ПАНОРАМНЫХ СНИМКОВ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

**М. Н. Фаворская, А. Г. Зотин, В. В. Буряченко**

*Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. М. Ф. Решетнева (СибГАУ), Красноярск*

Рассматривается алгоритм формирования панорамных снимков, с применением стабилизации видеоматериала, полученного от нескольких откалиброванных видеокамер. Разработан алгоритм стабилизации видеопоследовательностей, основанный на методе соответствия блоков. Представлены результаты тестирования алгоритма стабилизации.

*Ключевые слова:* Стабилизация видео, метод соответствия блоков, панорама, стереозрение.

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование качественных панорамных снимков требуется при проведении аэрофотосъемки, когда используются две стереовидеокамеры, осуществляющие одновременную съемку местности, или при съемке видеоматериалов с мобильных платформ, которые в общем случае могут быть оснащены несколькими видеокамерами (до 8 датчиков). Одной из проблем получения качественных панорамных снимков считаются механические вибрации, возникающие во время движения. Основная цель стабилизации видеопоследовательностей заключается в компенсации нежелательной вибрации вследствие механического дрожания. Далее осуществляется синтез панорамных снимков из нескольких видеопоследовательностей с учетом стабилизации траектории движения видеокамер. На основе полученных стабилизированных панорамных снимков можно построить одну видеопоследовательность, пригодную для решения последующих задач видеобработки. Таким образом, задача разделяется на три этапа: стабилизация исходных видеопоследовательностей, построение панорамных изображений и улучшение качества панорамных изображений.

Цифровая система стабилизации изображения вначале оценивает нежелательные движения, а затем исправляет последовательности изображений. Вполне вероятно, что в будущем стабилизацию изображения будут выполнять аппаратные системы захвата движения. Однако для этого требуется разработать и отладить алгоритмы, пригодные для аппаратной реализации.

Существуют два основных подхода для решения поставленной задачи: механический подход и связанный с цифровой обработкой изображений. Механический (оптическая стабилизация) активизирует оптические системы для настройки датчиков движения камеры, когда происходит дрожание, например, с применением устойчивой установки камеры или гироскопических стабилизаторов. Хотя этот метод хорошо работает на практике, он широко не используется

---

**Фаворская Маргарита Николаевна** — заведующая кафедрой, доктор технических наук, профессор, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

**Зотин Александр Геннадьевич** — доцент, кандидат технических наук, e-mail: zotinkrs@gmail.com.

**Буряченко Владимир Викторович** — аспирант, e-mail: buryachenko@sibsau.ru.

из-за необходимости применения дорогостоящих устройств и ограничения движений камеры [Brooks, 2003]. Другой подход заключается в программной стабилизации отснятых видеоматериалов. Именно он рассматривается в данной работе.

### ПОДХОДЫ И КОНЦЕПЦИЯ РАССМАТРИВАЕМОГО АЛГОРИТМА

Задача стабилизации видеопоследовательности решается с применением метода соответствия блоков (block-matching method). Получение вектора движения основано на сравнении блока предыдущего кадра с блоками текущего, смещенными на несколько пикселей. Находятся блоки с минимальной разницей, и величина смещения от центрального пиксела записывается в массив локальных векторов движения. Нахождение минимальной разницы между блоками осуществляется по формуле:

$$MD = \min(D(x, y)), \quad \forall x, y \in 0 \dots N, \quad (1)$$

где  $MD$  — минимальная разница значений интенсивности;  $D$  — текущая разница значения интенсивности;  $x, y$  — строка и столбец массива;  $N$  — размерность массива.

При рассмотрении видеопоследовательности, содержащей движущиеся объекты, оценивается вектор смещения каждого объекта в плоскости изображения методом полного поиска соответствия блоков (FSBMA). Текущий кадр разделен на матрицы «макроблоков», которые включают соответствующий блок и его ближайших соседей на предыдущем кадре [Farid, Woodward, 2007]. Это позволяет построить вектор движения макроблока от одного места к другому на предыдущем кадре. Такое смещение, вычисленное для всех макроблоков, представляет собой оценку движения на текущем кадре. Область поиска для соответствия макроблока ограничено до  $p$  пикселей во все стороны на предыдущем кадре. Тогда параметр  $p$  считается поисковым параметром (рис. 1). Увеличение значения  $p$  позволяет находить относительно большие сдвиги, но делает процесс поиска движения ресурсоемким. Соответствие одного макроблока другому основано на выводе функции стоимости. Макроблок с наименьшим значением функции стоимости соответствует текущему блоку.

Общая схема алгоритма стабилизации содержит этапы оценки движения, компенсации движения и восстановления кадра видеопоследовательности с применением алгоритма восстановления границ на основе информации из предыдущих

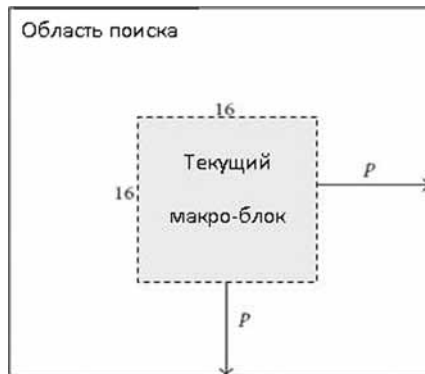


Рис. 1. Область поиска размеров 16 пикселей и сдвиг в  $p$  пикселей

кадров, а также постобработки видеоматериала, а именно применение пространственно-временной фильтрации.

После получения кадра находятся локальные векторы движения с использованием метода соответствия блоков. Работа модуля расчета локальных векторов движения заключается в выполнении сравнения блока предыдущего кадра с блоком текущего и небольшого сдвига на  $p$  пикселей [Farid, Woodward, 2007]. Функция сравнения блоков рассчитывает соответствие двух анализируемых блоков на основе различных метрик, выбираемых пользователем. Реализован выбор следующих метрик: MSE, усовершенствованный MSE, PSNR, усовершенствованный PSNR, а также простая разница интенсивности пикселей. Приведем формулы вычисления сравнений по метрикам MSE и PSNR:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(x, y) - K(x, y)|^2, \quad (2)$$

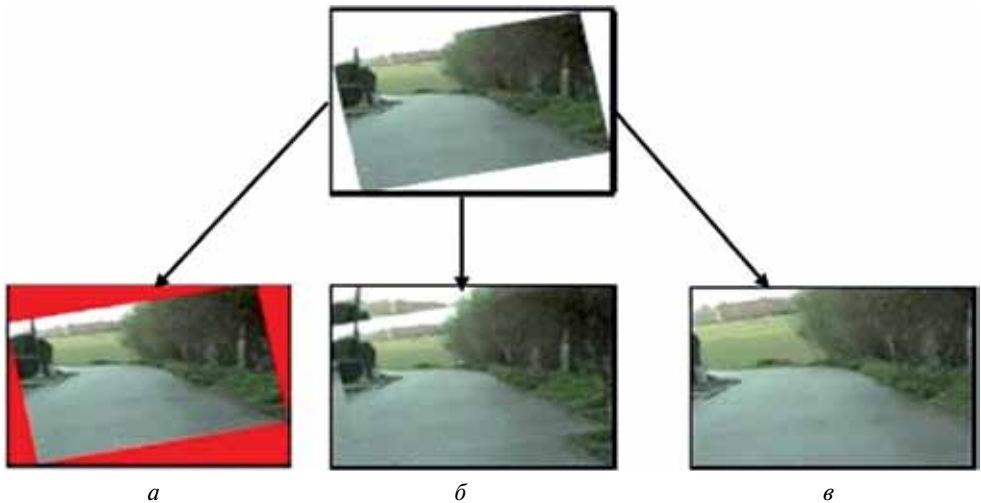
где  $m, n$  — ширина и высота изображения;  $I(i, j), K(i, j)$  — пиксели текущего и предыдущего изображения;

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (3)$$

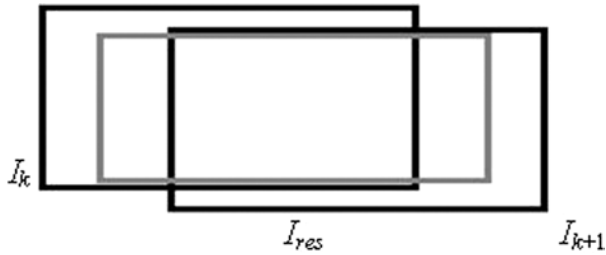
где  $MAX_I$  — это максимальное значение, принимаемое пикселем изображения. В свою очередь модуль построения глобального вектора движения проводит расчет на основе локальных векторов по формуле:

$$GV = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [LV_x(i, j) + LV_y(i, j)]. \quad (4)$$

После нахождения глобального вектора движения кадра выполняется компенсация движения. Данный этап включает решение задачи учета глобального движения кадра и восстановление границ, выпавших за рамки кадра (рис. 2).



**Рис. 2.** Примеры методов восстановления границ изображения: *a* — обрезка кадра; *б* — восстановление границ без учета движения; *в* — восстановление границ с учетом векторов движения



**Рис. 3.** Построение результирующего изображения на основе двух исходных кадров  $I_k$  и  $I_{k+1}$ , полученных с разных видеокамер

### СОВМЕЩЕНИЕ КАДРОВ, СНЯТЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ВИДЕОКАМЕР

При съемке видеопоследовательности несколькими видеокамерами для синхронизации, как правило, используются методы стереовидения, например линейной реконструкции изображения. Рассмотрим реализацию этой задачи при помощи аппарата особых точек, где на каждом изображении  $I_{(k)}$  выбираются особые точки  $P_{(j,k)}$  и ищутся соответствующие им на изображениях  $I_{(k)}$ ,  $I_{(k+1)}$ . Модель движения, использующая особые точки, приведена в работе [Cai, Walker, 2009]:

$$I(x, y, t + \tau) = I(x - \xi(x, y, t, \tau), y - \eta(x, y, t, \tau)), \quad (5)$$

где  $\delta = (\xi, \eta)$  — вектор смещения;  $I_{(x,y,t)}$  — изображение с координатами  $x, y$  в момент времени  $t$ .

Несмотря на то, что использование аппарата особых точек требует значительных временных затрат, преимущество метода — в высокой надежности определения смещений. Наиболее значимым отличием многопоточной съемки считается больший обзор снимка местности, что дает возможность выбора стабильной центральной части изображения для любого кадра видеопоследовательности. На рис. 3 представлена схема построения результирующего изображения на основе двух исходных кадров.

Преимущество данного подхода — большая зона охвата по сравнению со съемкой одной камерой, что позволяет избежать уменьшения разрешения при формировании видеопоследовательности во время стабилизации видео. Данный метод также позволяет использовать информацию из предыдущих кадров при аэрофотосъемке. Отличие метода от применяемых подходов к стабилизации видеопоследовательностей — низкая зависимость от способов определения движения, а также высокая устойчивость к наличию движущихся объектов в кадре.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было проведено тестирование первого этапа предложенного алгоритма на различных видеопоследовательностях, содержащих движение камеры и объектов. Скорость работы программы тестировалась на видеопоследовательностях размерами 352...240 и 640...480 пикселей. Качество стабилизации оценивалось с использованием метода, предложенного в работе [Ko-Cheung, Wan-Chi, 2007]. Для исходной видеопоследовательности и стабилизированного видеоматериала находилась разница предыдущего и текущего кадров по известной метрике PSNR.

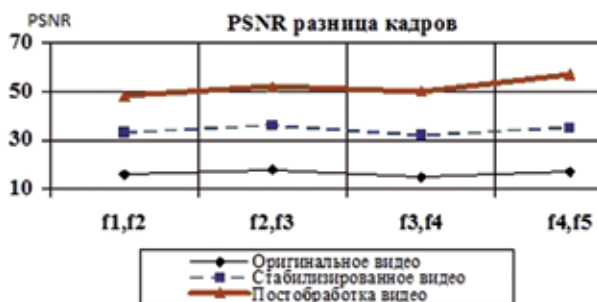


Рис. 4. PSNR разница между кадрами исходной, стабилизированной и обработанной временным фильтром 2D\_Cleaner видеопоследовательности

Применение пространственно-временного фильтра 2D\_Cleaner при стабилизации видеоматериала значительно улучшает качество, устраняя следы мелкого дрожания видеопоследовательности, от которого не удалось избавиться при стабилизации.

Видно, что PSNR-разница кадров стабилизированной последовательности заметно выше, что говорит о меньшей разнице между кадрами (более низкое влияние дрожания камеры). Также, при применении временного фильтра PSNR-значение видеопоследовательности увеличивается до 30 %. Использовались следующие параметры: разрешение видеоматериала 640...480 пикселей, размер блока 16...16 пикселей, расстояние поиска 6 пикселей (рис. 4).

Тестирование показало, что алгоритм успешно выполняет стабилизацию видеопоследовательности со статичным фоном и движущимися объектами при значительном дрожании кадра. Качество видеоматериала по метрике PSNR улучшается в 2...4 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм создания панорамных снимков на основе стабилизированных видеопоследовательностей пригоден как при наличии одной видеопоследовательности, так и при стереовидеопоследовательностях. Алгоритм разрабатывался при условии статичного фона сцены с движущимися объектами. Проведенные эксперименты показали, что PSNR-значение видеопоследовательности улучшается в 2...4 раза, а с применением временного фильтра увеличивается на 30 %.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Brooks, 2003] Brooks A. C. Real-Time Digital Image Stabilization // EE 420 Image Processing Computer Project Final Paper. EED Northwestern University, USA. 2003. P. 10.
- [Cai, Walker, 2009] Cai J., Walker R. Robust video stabilization algorithm using feature point selection and delta optical flow // IET Computer Vision. 2009. V. 3. N. 4. P. 176–188.
- [Farid, Woodward, 2007] Farid H., Woodward J. B. Video Stabilization and Enhancement: Technical Report. TR2007–605. Department of Computer Science, Dartmouth College. 2007.
- [Ko-Cheung, Wan-Chi, 2007] Ko-Cheung H., Wan-Chi S. Extended analysis of motion-compensated frame difference for block-based motion prediction error // IEEE Trans. Image Processing. 2007. V. 16. N. 5. P. 1232–1245.

**IMPROVEMENT OF PANORAMIC IMAGES BASED  
ON VIDEO SEQUENCES STABILIZATION**

**M. N. Favorskaya, A. G. Zotin, V. V. Buryachenko**

*Siberian State Aerospace University after academician M. F. Reshetnev  
(SibSAU), Krasnoyarsk*

The algorithm for design of panoramic images from multiple calibrated cameras with a possibility of video stabilization is presented. The algorithm of video sequences stabilization based on block-matching method is discussed. Also the experimental results of proposed stabilization algorithm are considered.

*Keywords:* video stabilization, block-matching method, panoramic photo, stereovision.

---

**Favorskaya Margarita Nikolaevna** — head of department, doctor of technical science, professor, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

**Zotin Alexander Gennadyevich** — associate professor, PhD, e-mail: zotinkrs@gmail.com.

**Buryachenko Vladimir Victorovich** — PhD-student, e-mail: buryachenko@sibsau.ru.

## КАСКАДНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА В ВИДЕОПОТОКЕ

**Е. В. Шальнов, В. А. Кононов, В. С. Конушин, А. С. Конушин**

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
(МГУ имени М. В. Ломоносова), Москва*

Предлагается каскадный алгоритм для сопровождения лица человека в видеопотоке в виде последовательности алгоритмов сопровождения, которые сменяют друг друга в случае ухудшения качества отслеживания. В качестве базовых алгоритмов используется кросскорреляция шаблонов и алгоритм на основе сопоставления областей по цвету с использованием фильтра частиц. Предлагается дополнить каскад новым алгоритмом для отслеживания лица с использованием маски переднего плана.

*Ключевые слова:* сопровождение лица, вычитание фона, наивный байесовский классификатор.

### ВВЕДЕНИЕ

В системах охранного видеонаблюдения, при анализе аудитории в маркетинговых целях необходимо определять количество людей в видеопотоке, распознавать их по лицу, в том числе определять пол, возраст и другие характеристики. Алгоритмы, решающие эти задачи, на входе получают последовательность изображений лица. Кроме того все они вычислительно сложны. Если посылать на анализ все лица, найденные в видео, то каждый из таких алгоритмов будет обрабатывать одного человека несколько раз, что сильно увеличит вычислительную сложность. Поэтому желательно однократно запускать их для каждого отдельного человека. Для этого выделенное лицо требуется сопровождать в режиме реального времени. Поскольку большая часть вычислительных ресурсов требуется для выделения лиц в видеопотоке и их распознавания, то алгоритм сопровождения должен действовать как можно меньшую долю вычислительных ресурсов. В то же время алгоритм должен позволять устойчиво сопровождать лицо человека на как можно более длительных промежутках времени, что позволит уменьшить количество обращений к функциям распознавания. Таким образом, необходимо иметь возможность объединить вычислительную эффективность алгоритма отслеживания с низкой вероятностью потери объекта слежения.

Большинство из существующих вычислительно эффективных алгоритмов отслеживания объектов, таких как сопоставление шаблонов через кросскорреляцию или метод на основе сдвига среднего, надежно работают только при соблюдении определенных условий, при нарушении которых сопровождаемый объект теряется. Поскольку оптимальные условия работы для каждого алгоритма отличаются, то объединив несколько алгоритмов в каскад, можно получить надежный и одновременно вычислительно эффективный алгоритм.

---

**Шальнов Евгений Вадимович** — студент, e-mail: [eshalnov@graphics.cs.msu.ru](mailto:eshalnov@graphics.cs.msu.ru).

**Кононов Владимир Андреевич** — аспирант, e-mail: [vkonoнов@graphics.cs.msu.ru](mailto:vkonoнов@graphics.cs.msu.ru).

**Конушин Вадим Сергеевич** — научный сотрудник, e-mail: [vadim@graphics.cs.msu.ru](mailto:vadim@graphics.cs.msu.ru).

**Конушин Антон Сергеевич** — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: [ktosh@graphics.cs.msu.ru](mailto:ktosh@graphics.cs.msu.ru).

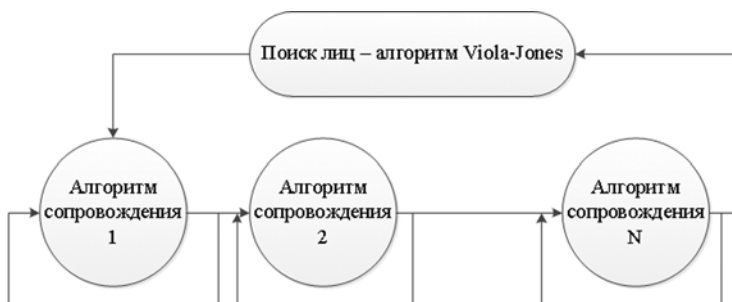
В данной работе предлагается каскадный алгоритм для отслеживания лица человека в видеопотоке, основанный на методе [Stenger et al., 2009]. В качестве базовых алгоритмов сопровождения лица используется кросскорреляция шаблонов и алгоритм на основе сопоставления областей по цвету с использованием фильтра частиц.

Также предлагается дополнить каскад новым алгоритмом для сопровождения лица, использующим маску переднего плана. Этот алгоритм учитывает информацию о статичности камеры и известной форме головы человека. Предложенный алгоритм позволяет сопровождать голову человека в ситуациях, когда другие алгоритмы теряют лицо. Такое происходит, например, когда человек отворачивается. Кроме того, за счет использования интегральных изображений можно добиться скорости сопровождения достаточной для систем видеонаблюдения реального времени.

### КАСКАД АЛГОРИТМОВ ОТСЛЕЖИВАНИЯ

В работе [Stenger et al., 2009] был предложен метод объединения алгоритмов сопровождения в каскад на основе оценки надежности слежения. Поскольку в разных алгоритмах сопровождения используется разные метрики оценки качества работы, то, прежде всего, необходимо определить зависимости между ними. Для решения этой задачи на этапе обучения на эталонной выборке вычисляется зависимость между метрикой качества работы каждого метода и надежностью слежения.

На рис. 1 представлена блок-схема каскадного алгоритма сопровождения. Каскад состоит из нескольких шагов. На первом шаге необходимо найти лицо человека, которое будет отслеживаться. Для этого используется хорошо известный алгоритм поиска лиц Viola-Jones [Viola, Jones, 2001]. Так как алгоритм поиска лиц может давать большое число ложных срабатываний, то необходимо проводить фильтрацию результатов. Для этого хорошо подходит использование маски переднего плана. Поэтому на первом шаге также используется алгоритм вычитания фона. По каждому из найденных лиц инициализируется первый алгоритм сопровождения в каскаде, который будет определять положения лиц на последующих кадрах. На втором шаге происходит сопровождение лиц людей, найденных на предыдущем шаге. Слежение переключается на следующий алгоритм в каскаде, когда оценка надежности слежения предыдущего алгоритма опускается ниже порога.



**Рис. 1.** Блок-схема каскада. Переход к следующему алгоритму сопровождения происходит при понижении значения метрики качества сопровождения текущего алгоритма ниже порога



Каскадный алгоритм отслеживания лица в видеопотоке с использованием на одном из этапов маски переднего плана позволяет решать задачу, с одной стороны, вычислительно эффективно, с другой — уменьшает вероятность потерять отслеживаемые лица.

### АЛГОРИТМ СОПРОВОЖДЕНИЯ ПО МАСКЕ ПЕРЕДНЕГО ПЛАНА

В каскадном алгоритме сопровождения для каждого кадра вычисляется маска переднего плана для фильтрации результатов при обнаружении лиц. В рассматриваемом сценарии передним планом будут люди, проходящие на статичном фоне. Замечено, что при этом для обнаружения и отслеживания лица человека на очередном кадре зачастую бывает достаточно обрабатывать лишь бинарную маску переднего плана (рис. 2). Благодаря тому, что хорошо известна форма головы человека, можно оценить какое количество пикселей переднего плана должны находиться на лице человека и в его окрестности.

Мы использовали алгоритм ViBe [Barnich, Droogenbroeck, 2009] для вычитания фона, поскольку он позволяет быстро и с приемлемым уровнем качества выделять пиксели объектов переднего плана.

Введем признаки для определения того, насколько данная прямоугольная область маски переднего плана похожа на голову отслеживаемого. Рассмотрим пять областей — область лица человека и четыре смежные с ней области. Они выделены на рис. 3.



Рис. 2. Исходный кадр видеопоследовательности и маска переднего плана



Рис. 3. Фрагмент исходного изображения, маска переднего плана, ему соответствующая, и пять прямоугольных областей рассматриваемых при отслеживании лица

Если область 3 находится на голове человека, то области 1, 2 и 4 содержат фрагменты изображения, где преобладают фоновые пиксели, в то время как области 3 и 5 соответствует фрагментам изображения, содержащим пиксели переднего плана. Таким образом, в рассматриваемой задаче важным свойством будет отношение количества пикселей переднего плана к размеру области. Для определения того, насколько область изображения (область 3 на рис. 3) похожа на голову человека, предлагается использовать в качестве признаков описанные выше свойства пяти областей рассмотренных на рис. 3.

После вычисления используемых признаков, необходимо провести классификацию рассматриваемой области по принципу: «лицо», «не лицо». При этом нет необходимости учитывать связи между признаками, что позволяет нам ограничиться использованием лишь наивного байесовского классификатора [Koller, Friedman, 2009]. Это означает, что вероятность принадлежности рассматриваемой области лицу может быть представлена как произведение факторов, непосредственно влияющих на вероятность принадлежности рассматриваемой области лицу. Такую вероятность определим используя лог-линейную модель:

$$P(y = \text{«лицо»}) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^5 \omega_i \left( M_i - f(x_i, m) \right) \right],$$

где:  $y$  — метка рассматриваемой области;  $x_i$  — прямоугольные области, используемые для классификации;  $m$  — маска переднего плана текущего кадра видео;  $f(x, m)$  — функция определения наполненности области  $x$  пикселями переднего плана;  $M_i$  — среднее значение наполненности  $i$ -й области, вычисленное для лиц;  $\omega_i$  — вес. При обучении модели были получены значения для параметров  $M_i$ : 0,17; 0,05; 0,9; 0,05; 0,95.

Для решения задачи сопровождения необходимо сначала найти  $x_{(t+1)}^i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, M\}$  — множество априорных предположений о положении головы на следующем кадре видео, зная ее положение на предыдущем кадре. Для этого достаточно заметить, что многие камеры, используемые в задачах видеонаблюдения, делают не менее 15 кадров в секунду. Таким образом, можно использовать предположение о том, что между кадрами лицо человека на изображении смещается не сильно. Тогда достаточно рассмотреть лишь небольшое количество предположений о положении лица отслеживаемого человека на новом кадре. Пусть  $x_{(t)}$  — положение лица на предыдущем кадре, тогда достаточно рассмотреть лишь такие  $x_{(t+1)}^i$ , что выполняется условие:

$$\|x_{(t)} - x_{(t-1)}^i\| < \varepsilon, \quad 1 \leq i \leq M.$$

Здесь параметр  $\varepsilon$  максимальное расстояние, на которое может сдвинуться лицо человека между двумя кадрами.

Для каждого априорного положения  $x_{(t+1)}^i$  лица человека на новом кадре можно определить апостериорную вероятность нахождения лица в данной области. Для этого используется классификация области, описанная выше. Априорное предположение, распознанное как лицо с наибольшим откликом, считается положением лица человека на новом кадре видеопоследовательности. Таким образом, если  $y_{(t+1)}^i$  — метка области  $x_{(t+1)}^i$ ,  $y_{(t+1)}^i \in \{\text{«лицо»}, \text{«не лицо»}\}$ , то

$$x_{(t+1)} = x_{(t+1)}^i : y_{(t+1)}^i = \arg \max_{1 \leq j \leq M} P \left( y_{(t+1)}^j = \text{«лицо»} \right).$$

Основное достоинство описанного алгоритма — возможность отслеживания лица в ситуациях, когда другие алгоритмы сопровождения теряют его. Такое может произойти, например, в ситуации, когда человек отворачивается от камеры. В этом случае и алгоритм на основе кросскорреляции, и алгоритм на основе цветового отслеживания лица не смогут найти лицо на новом кадре. Предлагаемый алгоритм способен справиться с такой ситуацией, поскольку маска переднего плана при этом не изменится.

У рассмотренного алгоритма есть и недостаток. Существуют ситуации, когда предложенная схема отслеживания лиц не сможет найти положение лица человека на новом кадре. Такое происходит, например, когда позади сопровождаемого человека проходит еще один. В этом случае маска переднего плана перестает напоминать силуэт человека. В таких случаях другие алгоритмы сопровождения (например, на основе кросскорреляции) будут безошибочно отслеживать лицо.

Для использования предложенного метода в составе каскада необходимо определить метрику качества сопровождения лица. Такой метрикой может служить описанная выше апостериорная вероятность наблюдать лицо в прямоугольной области принятой за положение лица на данном кадре —  $P(y = \text{«лицо»})$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены результаты работы алгоритма. Представлены алгоритмы сопровождения с использованием кросскорреляции, маски переднего плана и каскадный алгоритм. Столбцы соответствуют разным кадрам тестового видео.

Сравнивая первые две строки с третьей можно увидеть, что каскадный алгоритм позволяет продолжать сопровождать лицо человека, когда часть составляющих его алгоритмов не способны это сделать.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За счет переключений между алгоритмами построенный каскад позволяет отслеживать лица в ситуациях, когда отдельные алгоритмы отслеживания давали сбой. При этом время, затраченное на обработку одного кадра каскадом, практически не отличается от времени обработки кадра индивидуальным алгоритмом.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-4644.2012.9 и РФФИ (проект № 11-01-00957-а).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Barnich, Droogenbroeck, 2009] *Barnich O., Van Droogenbroeck M.* ViBe: a powerful random technique to estimate the background in video sequences // ICASSP. 2009. P. 945–948.
- [Koller, Friedman, 2009] *Koller D., Friedman N.* Probabilistic graphical models. Principles and techniques. MIT Press, 2009. P. 727.
- [Stenger et al., 2009] *Stenger B., Woodley T., Cipolla R.* Learning to track with multiple observers // IEEE Computer Soc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 2009. P. 2647–2654.
- [Viola, Jones, 2001] *Viola P., Jones M.* Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // IEEE Computer Soc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 2001. V. 1. P. 1-511–1-518.



**Рис. 4.** Результаты работы алгоритма. В первой строке представлены результаты работы алгоритма сопровождения на основе кросскорреляции, во второй строке — результаты алгоритма сопровождения на основе маски переднего плана, в третьей строке — результат работы каскада алгоритмов

## CASCADED FACE TRACKING

**E. V. Shalnov, V. A. Kononov, V. S. Konushin, A. S. Konushin**

*Lomonosov Moscow State University, Moscow*

In this paper we propose a cascaded face tracking algorithm. Cascade consists of several face tracking algorithms. The tracking is switched to next algorithm if performance of previous algorithm degrades. We use cross-correlation tracking, particle filter color tracking as separate stages. Also we propose to add to the cascade a new algorithm which uses a foreground mask.

*Keywords:* tracking, background subtraction, naïve bayes.

---

**Shalnov Eugen Vadimovich** — student, eshalnov@graphics.cs.msu.ru.

**Kononov Vladimir Andreevich** — postgraduate student, vkononov@graphics.cs.msu.ru.

**Konushin Vadim Sergeevich** — researcher, vadim@graphics.cs.msu.ru.

**Konushin Anton Sergeevich** — researcher, PhD, ktosh@graphics.cs.msu.ru.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЫСТРОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЫМА В ВИДЕОПОТОКЕ

**А. А. Маленичев, О. В. Красоткина**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тульский государственный университет»  
(ФГБОУ ВПО «ТулГУ»), Тула*

В статье представлен комбинированный метод для быстрого распознавания дыма в видеопоследовательностях с использованием методов предварительной обработки кадров. Дым характеризуется различными свойствами, такими как цвет, специфическим способом распространения, сглаживанием объектов, находящихся за дымом и т. п. Достаточно сложно описать их, используя простейшие особенности изображений. Обычно алгоритмы для распознавания дыма в видеопотоке используют различные особенности распространения области дыма и цветовые характеристики для описания задымления. Экспериментально было доказано, что применение данных подходов недостаточно, поскольку при их использовании возможно продуцирование большого количества ложных тревог. В данной работе будет показана целесообразность использования такого свойства дыма при распознавании, как прозрачность.

*Ключевые слова:* распознавание дыма в видеопотоке, методы распознавания образов, способы описания дыма.

### ВВЕДЕНИЕ

Основным требованием при детектировании дыма на газоперекачивающих станциях считается необходимость раннего обнаружения аварийной ситуации. Большинство современных химических детекторов для быстрого выявления задымленности должны находиться от источника дыма достаточно близко, что трудно обеспечить в таких больших помещениях, как подангарное пространство. Хорошей альтернативой традиционным химическим сенсорам в данном случае представляется система видеоконтроля задымленности. В отличие от точечного датчика дыма она будет объемным сенсором и позволит, помимо факта появления дыма, определять степень задымленности, число областей задымления, контуры и размеры этих областей, а также направление распространения дыма по помещению [Celik et al., 2007].

### КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ДЛЯ БЫСТРОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЫМА НА ВИДЕО

Первым этапом в обработке видеопотока будет балансировка цветовой схемы изображений, составляющих видео поток. Для этого вычисляется среднее значение каждой R, G, B цветовой компоненты изображения с целью получения реального уровня серого цвета. Это значение затем используется для реткалирования каждой компоненты (рис. 1).

---

Маленичев Антон Александрович — студент, e-mail: malenichev@mail.ru.

Красоткина Ольга Вячеславовна — доцент, кандидат физико-математических наук, e-mail: O.V.Krasotkina@yandex.ru.

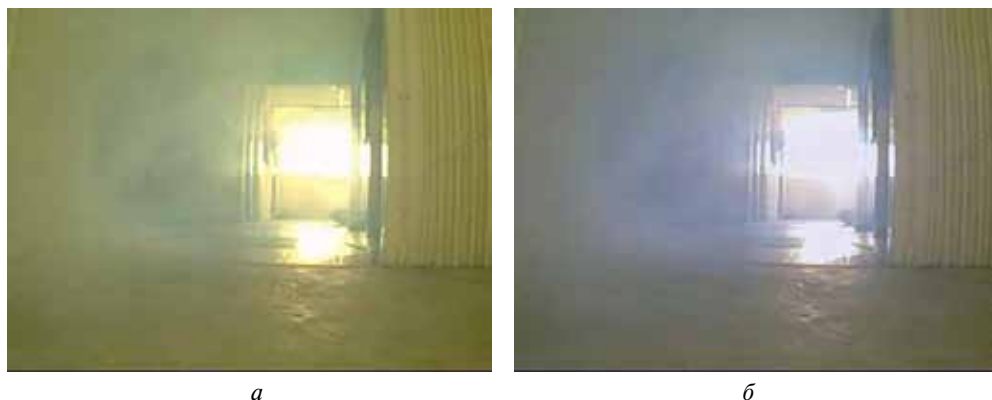


Рис. 1. Один кадр видеопотока до (а) и после (б) балансировки цвета

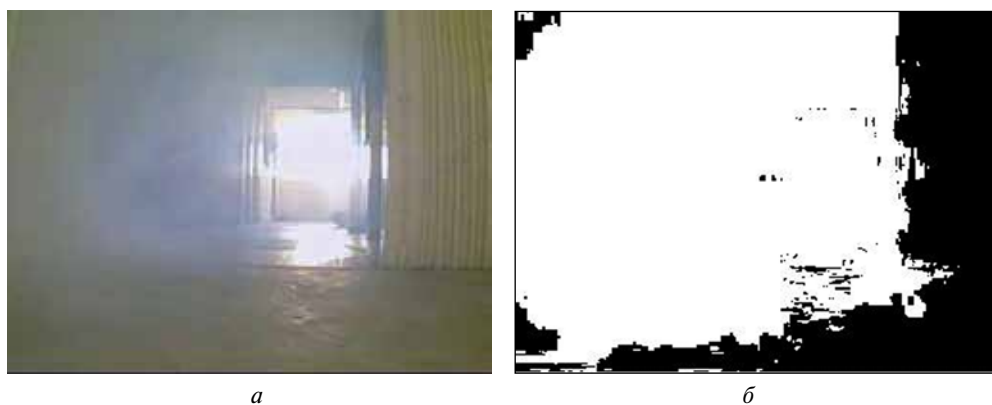


Рис. 2. Исходный кадр видеопотока (а) и результат восстановления цветовой компоненты дыма (б)

Следующим этапом обработки станет выделение на кадрах областей дыма, для чего используются цветовые характеристики областей задымления. Известно, что дым имеет цвет от светло- до темно-серого. Это свойство используется для выделения на изображениях потенциальных областей дыма, в которых интенсивности цветовых компонент находятся в следующем соотношении:

$$\begin{cases} |R - G| < T, \\ |G - B| < T, \\ |R - B| < T, \end{cases}$$

где  $T$  — порог, настраиваемый по обучающему набору видеофайлов [Buchsbbaum, 1980].

Результат обработки представляется в бинарном виде (рис. 4).

Естественно, использование цветовой характеристики для локализации областей задымления недостаточно. Известно, что области задымления не находятся в неподвижном состоянии, а постоянно перемещаются и меняют свои очертания. Поэтому следующим этапом обнаружения областей задымления станет обнаружение на кадрах видеопотока движущихся объектов.

Процедура обнаружения движущихся областей осуществляется с помощью рекуррентного пересчета фонового изображения в последовательности видеокладов [Chunyu et al., 2010]. Движущиеся объекты на изображении затем определяются с помощью вычитания каждой цветовой компоненты из фонового и отсеечения по порогу. Величина порога подбирается по обучающей последовательности видеороликов. На рис. 3 представлен результат восстановления на изображении областей, соответствующих движущимся объектам.

Области дыма затем оцениваются на основании совмещения движущихся областей изображения и областей, цветные компоненты которых соответствуют серому цвету.

Характерная черта дыма — сглаживание граней объектов, находящихся за областью задымления, что сильно влияет на изменение энергии спектра кадра по сравнению с фоном.

Возьмем пиксел  $P_{i,j}$ . Применим к  $i$ -й строке фильтр Гаусса:

$$F(x) = \exp\left\{\frac{-(x - M)^2}{\sigma^2}\right\},$$

где  $M$  — математическое ожидание;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение (рис. 4). СКО задается вручную, математическим ожиданием является номер пиксела в строке  $j$ .

Применяя разложение в спектр Фурье к фильтрованному сигналу, можно определить его энергию, которая равна сумме коэффициентов при разных частотах гармоник спектра. Взяв соотношение энергий текущего кадра и фона, получим коэффициент отличия энергий спектров. Если на сцене имеется область дыма, грани объектов сглаживаются несильно и данный коэффициент принимает не слишком большие значения. Если присутствует серый непрозрачный движущийся объект, грани объектов за ним перекрываются и коэффициент отличия энергий принимает большие значения. Диапазон допустимых значений подбирается по обучающей последовательности видеороликов.

На рис. 5 представлен результат восстановления на изображении областей, удовлетворяющих требованиям сглаживания граней.

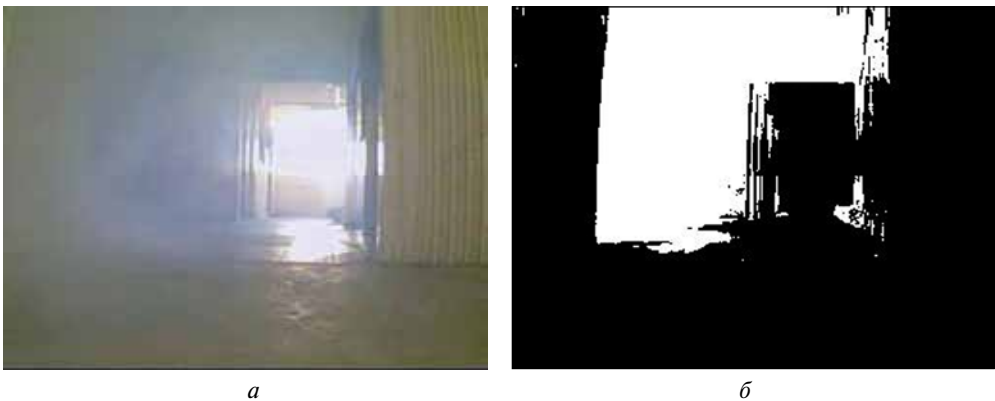


Рис. 3. Исходный кадр видеопотока (а) и результат поиска на изображении движущихся объектов (б)



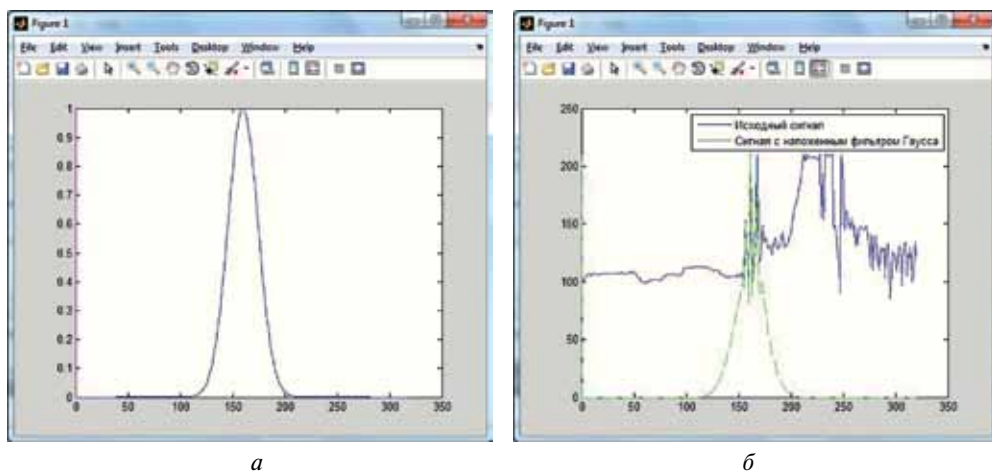


Рис. 4. Фильтр Гаусса (а) и его наложение на сигнал строки изображения (б)

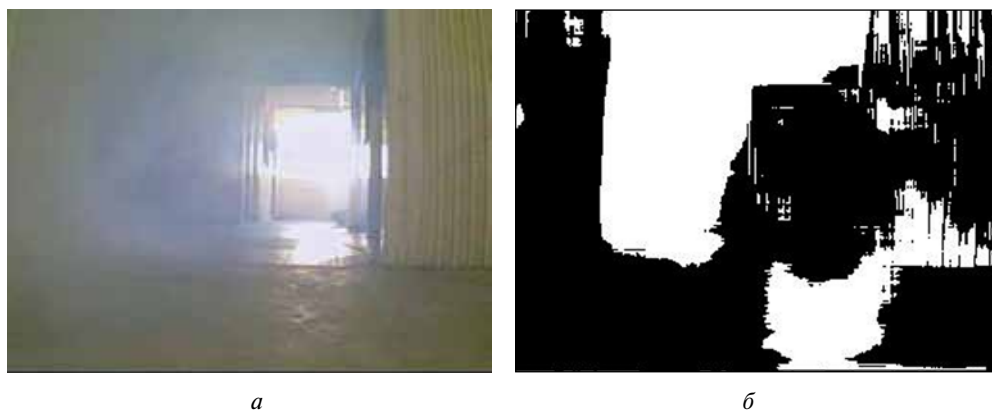


Рис. 5. Исходный кадр видеопотока (а) и результат поиска на изображении объектов, сглаживающих грани (б)

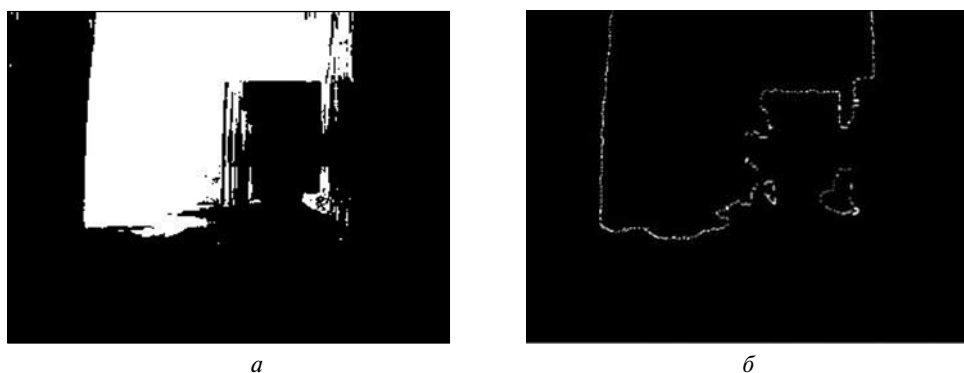


Рис. 6. Движущаяся область, соответствующая дыму (а), и ее оцененный контур (б)

Другая характерная черта областей задымления в том, что дым распространяется в основном вверх со вполне определенной скоростью. Кроме того, особенность областей дыма — наличие завихрений, мгновенной мерой оценки которых будет функция турбулентности:

$$\Omega(t) = \frac{P(t)}{2\sqrt{\pi A(t)}},$$

где  $P(t)$  — периметр области дыма;  $A(t)$  — ее площадь [Catrakis, Dimotakis, 1998].

Для определения  $P(t)$  на каждом кадре видеопотока проводится оценка контуров областей задымления с помощью процедуры медианной фильтрации изображений, составляющих видеопоток после локализации на них областей дыма (рис. 6).

Для видеосистем детектирования дыма основное требование — как можно более раннее обнаружение его появления. Для этого определяется производная функции турбулентности

$$\frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{2P'(t)A(t) - P(t)A'(t)}{4\sqrt{\pi} \cdot A(t)^{3/2}},$$

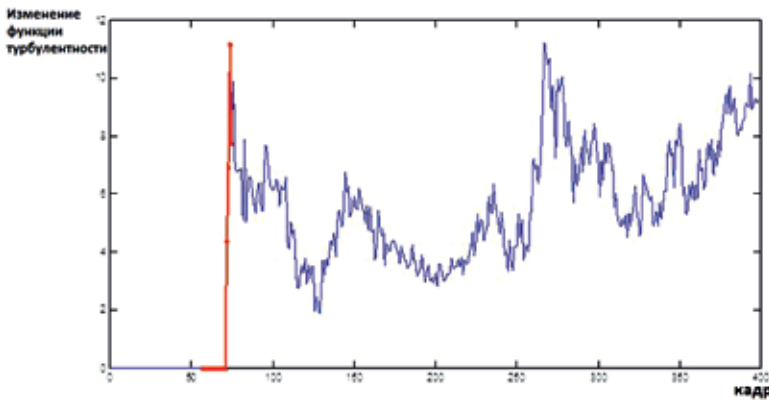


Рис. 7. Кумулятивная сумма изменений функции турбулентности области задымления



Рис. 8. Кадр видеофрагмента, соответствующий моменту появления дыма в помещении

характеризующая степень изменения турбулентности. Достаточно большие значения производной данной функции будут соответствовать моменту возникновения и началу распространения дымовой завесы. Момент возникновения дыма определяется как превышение некоторого порога кумулятивной суммой значений функции. Порог настраивается по обучающей последовательности видеофрагментов. На рис. 7 показана функция кумулятивной суммы, а на рис. 8 кадр видеофрагмента, соответствующий превышению кумулятивной суммой заданного порога.

Информация об обнаружении дыма должна передаваться в модуль экспертизы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен комбинированный метод быстрого распознавания дыма в видеопоследовательности. Основное отличие работы от подобных исследований — использование свойства прозрачности дымовой завесы. Показано, что с помощью преобразования Фурье можно достаточно простым способом найти сглаживания граней объектов, находящихся за областью дыма. Используя предлагаемый метод в комбинации с [Kopilovic et al., 2000], опубликованными ранее, можно добиться большей точности и устойчивости при распознавании дыма на видео.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Buchsbaum, 1980] *Buchsbaum G.* A spatial processor model for object color perception // J. Franklin Inst. 1980. V. 310. Iss. 1. P. 1–26.
- [Catrakis, Dimotakis, 1998] *Catrakis H. J., Dimotakis P. E.* Shape Complexity in Turbulence // J. Physical Review Letters. 1998. V. 80. N. 5. P. 968–971.
- [Celik et al., 2007] *Celik T., Ozkaramanly H., Demirel H.* Fire and Smoke Detection Without Sensors: Image Processing Approach // Proc. 15<sup>th</sup> European Signal Processing Conf. EUSIPCO. 2007. P. 1794–1798.
- [Chunyu et al., 2010] *Chunyu Y., Jun F., Jinjun W., Yongming Z.* Video Fire Smoke Detection Using Motion and Color Features // J. Fire Technology. 2010. V. 46. N. 3. P. 651–663.
- [Kopilovic et al., 2000] *Kopilovic I., Vagvolgyi B., Sziranyi T.* Application of panoramic annular lens for motion analysis tasks: surveillance and smoke detection // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Conf. Pattern Recognition. 2000. V. 4. P. 714–717.

## DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR RAPID SMOKE DETECTION IN VIDEO SEQUENCE

A. A. Malenichev, O. V. Krasotkina

Tula State University (TSU), Tula

This paper presents a combined approach for rapid smoke detection from video sequences using the pre-improvement methods. Smoke is characterized by different properties like a color, irregularities in motion, smoothing the edges, etc. There are hard to describe it using the basic image features. Usually the smoke detection algorithms use some color and turbulence features for the smoke description. But our

experiments show the high false alarm rate of such algorithms. In our work we propose the additional smoke description features based on smoke transparency.

*Keywords:* smoke detection, methods of pattern recognition, smoke description.

---

**Malenichev Anton Aleksandrovich** — student, e-mail: malenichev@mail.ru.

**Krasotkina Olga Vyacheslavovna** — docent, Candidate of Physico-mathematical Sciences, e-mail: O.V.Krasotkina@yandex.ru.

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЗНАКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ОБУЧЕНИЕМ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

**А. А. Чигорин, А. А. Конев, Г. Р. Кривовязь, А. Б. Велижев,  
А. С. Конушин**

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
(МГУ имени М. В. Ломоносова), Москва*

В данной работе предлагается использовать синтетически сгенерированные изображения знаков дорожного движения для обучения моделей для обнаружения, сегментации и распознавания. Полученные модели протестированы на четырех общедоступных базах знаков дорожного движения, содержащих знаки из трех стран. Полученная точность сравнима с точностью моделей, обученных на реальных данных.

*Ключевые слова:* распознавание образов, обнаружение объектов, распознавание знаков дорожного движения.

Автоматическое распознавание дорожных знаков может быть использовано при производстве навигационных карт, в системах помощи водителю или в управлении дорожной инфраструктурой. В первом случае знание положения знаков дорожного движения, их ориентации и класса позволит автоматизировать построение дорожного графа, во втором — информировать водителя о текущей ситуации на дороге, в третьем — поддерживать придорожную инфраструктуру.

Большинство существующих методов распознавания дорожных знаков можно вписать в следующую трехэтапную схему: обнаружение знака на изображении, уточнение положения знака и сегментация фона, распознавание класса знака. Уточнение положения может быть полезно, если обрабатываются результаты модуля обнаружения, который зачастую выдает несколько срабатываний вокруг объекта интереса. Удаление фона может существенно повысить точность распознавания класса знака.

В данной работе мы предлагаем алгоритмы для осуществления всех вышеописанных этапов. Для обнаружения знаков мы придерживаемся общей схемы построения детектора Виолы — Джонса [Viola, Jones, 2004] на основе каскада классификаторов, обучаемых с помощью бустинга. Но, в отличие от Виолы — Джонса, мы обучаем детектор на синтетических данных и используем признаки, описывающие разные свойства изображений — цвет, форму и текстуру. Это позволяет построить более эффективный классификатор (как по времени, так и по точности работы).

Для распознавания класса знака нами предложен двухэтапный алгоритм на основе поиска ближайшего соседа среди синтетических изображений, описанных

---

**Чигорин Александр Александрович** — аспирант, e-mail: aachigorin@graphics.cs.msu.ru.

**Конев Артём Александрович** — студент, e-mail: akonev@graphics.cs.msu.ru.

**Кривовязь Глеб Робертович** — аспирант, e-mail: gkrivovязь@graphics.cs.msu.ru.

**Велижев Александр Брониславович** — научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: avelizhev@graphics.cs.msu.ru.

**Конушин Антон Сергеевич** — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: ktosh@graphics.cs.msu.ru.

с помощью HOG-дескриптора [Dalal, Triggs, 2005]. На первом этапе происходит поиск примерного набора трансформаций знака, а также маски, отделяющей его от фона. Далее знак вырезается по маске и производится более плотное сэмплирование синтетических изображений в окрестности трансформаций обрабатываемого знака. Мы протестировали предложенный нами метод на трех общедоступных базах, содержащих немецкие, бельгийские и шведские знаки.

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Существующие методы обнаружения знаков можно разделить на две категории. В первую попадают те, которые опираются на известные, вручную подобранные особенности знаков — цвет [Stallkamp et al., 2011; Dalal, Triggs, 2005] и форму [Paclik et al., 2006; Ruta et al., 2011; Zaklouta et al., 2011]. Ко второй группе относятся методы, основанные на машинном обучении. В работе [Timofte et al., 2009] авторы предложили многошаговую схему, в которой на первых этапах происходит выделение знаков по форме и цвету с помощью обученных классификаторов. Затем наиболее перспективные кандидаты обрабатываются детектором, аналогичным детектору Виолы — Джонса. В результате была достигнута точность 97,6 % при 2,5 ложных срабатываниях на изображениях размером в два мегапиксела. В статье [Overett et al., 2011] предложены быстрые признаки и укороченная структура классификатора, состоящего из 4–5 этапов, что позволило добиться скорости работы детектора 20 мс. Заявленная точность для знака «въезд запрещен» составила 99,5 % при количестве ложных срабатываний  $10^{-9}$  на окно детектора.

Методы распознавания дорожных знаков можно разделить на две группы: по схожести и по признакам. В методах, основанных на схожести, входному изображению присваивается класс наиболее близкого примера из обучающей выборки. В работе [Ruta et al., 2011] предложен новый вариант AdaBoost — SimBoost, при помощи которого был обучен бинарный классификатор, возвращающий метки «знаки одного класса», либо «знаки разного класса». Расстояние определялось как обратное к уверенности классификатора, возвращающего метку «знаки одного класса». В работе [Zaklouta et al., 2011] был предложен гибридный подход, на основе метода случайного леса и K-D деревьев, работающих в пространстве дескрипторов «гистограммы ориентированных градиентов» (HOG).

Среди методов, основанных на признаках, можно выделить [Timofte et al., 2009], в которой использован двухуровневый классификатор SVM, работающий на пикселах изображения. На первом уровне определялся тип знака (треугольный, круглый, красный и т. д.). На втором этапе уточнялся класс знака внутри типа. Популярным подходом считается использование сверточных нейронных сетей. В статье [Ciresan et al., 2011] было использовано голосование многослойных нейронных сетей (MLP) и сверточных нейронных сетей (CNN) за класс знака. MLP обучались на признаках HOG [Dalal, Triggs, 2005], CNN — на случайным образом трансформированных изображениях, предобработанных с помощью алгоритма нормализации контраста CLAHE [Zuiderveld, 1994].

## СИНТЕЗ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Для синтеза обучающей выборки из интернета были собраны пиктограммы всех интересующих нас классов знаков. Далее над каждой пиктограммой выполнен следующий набор действий:

- сегментация знака на пиктограмме, получение маски фона;
- варьирование положения, размера, яркости, насыщенности, размытия, гауссовского шума изображений пиктограмм;
- вращение знака в трехмерном пространстве относительно трех осей и перспективное проецирование получаемых объектов на картинную плоскость;
- подкладывание фона из реального изображения без знаков, яркость фона приводится к яркости знака.

Примеры получаемых синтетических изображений приведены на рисунке.

### ОБНАРУЖЕНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ

Для обнаружения знаков используется модифицированный алгоритм Виолы-Джонса. В отличие от варианта, предложенного в оригинальной статье, можно использовать на каждом этапе разнообразные наборы признаков и классификаторов. За счет этого существенно повышается точность детектора при незначительном увеличении времени его работы. На первых этапах каскада используются простые признаки и классификаторы, на вычисление которых не нужно тратить много времени. Это позволяет быстро отсеять окна, в которых точно нет знака. На последних этапах признаки и классификаторы усложняются, что приводит к увеличению времени их вычисления и дискриминативной способности. Но до этих этапов доходит лишь малая часть рассматриваемых окон детектора, поэтому увеличения времени работы практически не происходит.

В нашей реализации на первых четырех этапах каскада используются быстрые признаки — разьединенные диполи [Balas, Sinha, 2003], опирающиеся на цвет. Над исходным изображением осуществляются преобразования цветов, характерных для знаков (красный, синий, желтый). Данные преобразования описаны в работе [Ruta et al., 2011]. В результате для каждого из характерных цветов получается карта уверенности в присутствии этого цвета в каждом пикселе. Таким образом, разьединенные диполи извлекались по изображению в градациях серого, по трем каналам R, G и B, по картам уверенности для красного, синего, желтого, белого и черного цветов (в зависимости от знака).



Примеры синтетических изображений знаков

На последующих этапах к разъединенным диполям добавляется более сильный признак — гистограмма ориентированных градиентов. Тем самым последние этапы нашего каскада похожи на схему, предложенную в [Zhu et al., 2006].

Для тестирования предложенного нами метода была выбрана база KUL Belgium Traffic Signs Dataset [Timofte, 2010]. Она состоит из 7356 изображений (всего 11219 размеченных на них знаков), на которых отображены 2459 уникальных физических знаков. В ходе экспериментов высчитывался процент верно обнаруженных физических знаков. Знак считался обнаруженным, если был найден хотя бы на одном изображении, содержащем его.

Для тестирования детектора выбралось подмножество запрещающих знаков, состоящее из 10 классов. Точность получилась равной 96,5 % при  $10^{-9}$  ложных срабатываний на окно детектора, что соответствует одному ложному на 100 изображений размером два мегапиксела.

### РАСПОЗНАВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ

Для распознавания знаков используется метод ближайшего соседа, работающий в пространстве дескриптора HOG. Классификатор на основе ближайшего соседа обладает простым свойством — чем больше примеров будет в обучающей выборке, тем лучше достигается точность классификации. Если предположить, что каждый параметр преобразования при генерации синтетической выборки будет сэмпирован три раза, то в результате получится более полумиллиона обучающих примеров. Увеличение плотности сэмпирования параметров будет экспоненциально увеличивать количество обучающих примеров. Поэтому применение даже приближенных методов поиска ближайшего соседа будет проблематичным. Чтобы обойти эту проблему алгоритм распознавания разбивался на два этапа. На первом происходит сэмпирование параметров трансформаций с большим шагом и поиск ближайшего соседа в полученной выборке. Тем самым можно найти примерное положение знака и маску фона. На втором этапе происходит более плотное сэмпирование параметров трансформации вокруг значений, найденных на первом, повторный поиск ближайшего соседа и уточнение положения знака и его класса.

Данный подход был протестирован на трех общедоступных базах, содержащих немецкие, бельгийские и шведские знаки. Параметры баз и результаты предложенного алгоритма приведены в таблице.

Результаты распознавания знаков на разных базах

Страна	Количество изображений в базе	Количество классов знаков	Точность распознавания, %
Германия	12000	43	95,49
Бельгия	2534	62	97,04
Швеция	2796	18	98,17

### ЛИТЕРАТУРА

[Balas, Sinha, 2003] *Balas B., Sinha P.* Dissociated Dipoles: Image Representation via Non-local Comparisons // CVCL Paper, AI Memo 2003-018 / Massachusetts Institute of Technology. MIT Press, 2003. 14 p.



- [Ciresan et al., 2011] *Ciresan D., Meier U., Masci J.* A Committee of Neural Networks for Traffic Sign Classification // IEEE Intern. Joint Conf. Neural Networks. San Jose, California. 2011. P. 1918–1921.
- [Dalal, Triggs, 2005] *Dalal N., Triggs B.* Histograms of oriented gradients for human detection // Proc. Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, USA. 2005. P. 886–893.
- [Overett et al., 2011] *Overett G., Tychsen-Smith L., Petersson L., Pettersson N., Andersson L.* Creating robust high-throughput traffic sign detectors using centre-surround HOG statistics // Machine Vision and Applications. 2011.
- [Paclik et al., 2006] *Paclik P., Novovicova J., Duin R.* Building Road-Sign Classifiers Using a Trainable Similarity Measure // IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems. 2006. V. 7. N. 3. P. 309–321.
- [Ruta et al., 2011] *Ruta A., Porikli F., Watanabe S.; Li Y.* In-vehicle Camera Traffic Sign Detection and Recognition // Machine Vision and Applications. 2011. V. 22. N. 2.
- [Stallkamp et al., 2011] *Stallkamp J., Schlipsing M., Salmen J., Igel C.* The German Traffic Sign Recognition Benchmark: A multi-class classification competition // Proc. Intern. Joint Conference on Neural Networks. San Jose, California, USA, July 31 – August 5, 2011.
- [Timofte et al., 2009] *Timofte R., Zimmermann K., Gool L. V.* Multi-view traffic sign detection, recognition, and 3D localization // Workshop on Applications of Computer Vision. Snowbird, Utah. 2009. P. 1–8.
- [Timofte, 2010] *Timofte R.* KUL Belgium Traffic Sign Classification Benchmark. 2010. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://homes.esat.kuleuven.be/~rtimofte>.
- [Viola, Jones, 2004] *Viola P., Jones M. J.* Robust Real-Time Face Detection // Intern. J. Computer Vision. 2004. P. 137–154.
- [Zaklouta et al., 2011] *Zaklouta F., Stanculescu B., Hamdoun O.* Traffic sign classification using K-d trees and Random Forests // IEEE Intern. Joint Conf. Neural Networks. San Jose, California, 2011. P. 2151–2155.
- [Zhu et al., 2006] *Zhu Q., Yeh M., Cheng K.* Fast Human Detection Using a Cascade of Histograms of Oriented Gradients // Computer Vision and Pattern Recognition. 2006.
- [Zuiderveld, 1994] *Zuiderveld K.* Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization // Graphic Gems IV. San Diego: Academic Press Professional, 1994. P. 474–485.

## TRAFFIC SIGNS RECOGNITION ON IMAGES WITH TRAINING ON SYNTHETIC DATA

A. A. Chigorin, A. A. Konev, G. R. Krivoviyaz, A. B. Velizhev, A. S. Konushin

*Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow*

In this work we propose to use synthetically generated traffic signs images for training models for detection, segmentation and recognition. Obtained models were tested on four publicly available traffic signs databases containing signs from free different countries. Obtained accuracy is comparable with accuracy of models, trained on a real data.

*Keywords:* pattern recognition, object detection, traffic signs recognition.

---

**Chigorin Alexander Alexandrovich** — PhD-student, e-mail: [aachigorin@graphics.cs.msu.ru](mailto:aachigorin@graphics.cs.msu.ru).

**Konev Artem Alexandrovich** — student, e-mail: [akonev@graphics.cs.msu.ru](mailto:akonev@graphics.cs.msu.ru).

**Krivoviyaz Gleb Robertovich** — PhD-student, e-mail: [gkrivoviyaz@graphics.cs.msu.ru](mailto:gkrivoviyaz@graphics.cs.msu.ru).

**Velizhev Alexander Bronislavovich** — PhD, researcher, e-mail: [avelizhev@graphics.cs.msu.ru](mailto:avelizhev@graphics.cs.msu.ru).

**Konushin Anton Sergeevich** — PhD, researcher, e-mail: [ktosh@graphics.cs.msu.ru](mailto:ktosh@graphics.cs.msu.ru).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА СТЕРЕОСИСТЕМОЙ С МАЛОЙ БАЗОЙ

В. А. Карташев<sup>1</sup>, С. С. Ефимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки *Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Москва*

<sup>2</sup> *Институт информационных наук и технологий безопасности Российского государственного гуманитарного университета (ИИНТБ РГУ), Москва*

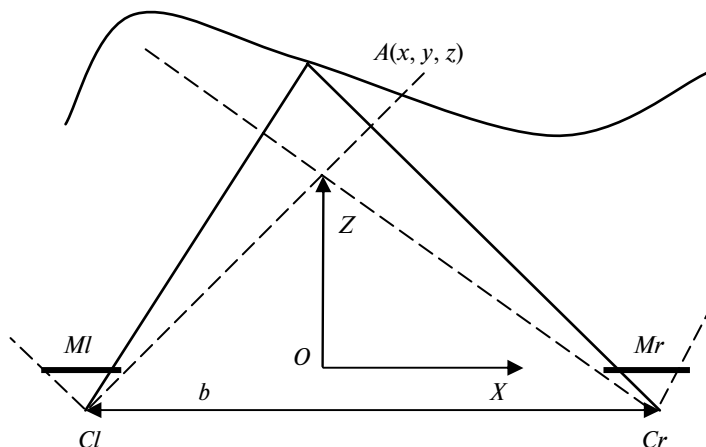
Исследуются погрешности определения местоположения, формы и размеров подвижного объекта при измерениях, проводимых с помощью видеостереосистемы с малой стереобазой.

*Ключевые слова:* видеостереосистема, исследование точности измерений.

Малость стереобазы делает возможным создание компактного измерительного устройства, удобного для использования в подвижных роботизированных устройствах.

Рассматриваемая стереосистема состоит из двух одинаковых видеокамер с углом зрения объектива  $90^\circ$ . Оптические оси видеокамер параллельны и расположены в горизонтальной плоскости на расстоянии  $b$  (стереобаза). Предполагается, что  $10 < b < 20$  см. Стереосистема обеспечивает обработку измерений 30 кадров в секунду при разрешении  $640 \times 480$  точек. Видеокамеры не синхронизованы. Вследствие этого моменты времени начала считывания кадра камерами могут отличаться на некоторую величину.

На рисунке представлена схема стереосистемы:  $Cl$  и  $Cr$  — оптические центры видеокамер;  $Ml$  и  $Mr$  — видеоматрицы;  $f$  — расстояние между оптическим центром и плоскостью матрицы. Начало системы координат  $Oxz$  находится посередине между оптическими центрами.



Изображение точки А на видеоматрицах

**Карташев Владимир Алексеевич** — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: kart@list.ru.

**Ефимов Сергей Сергеевич** — студент, e-mail: sargikk@mail.ru.

Во введенных обозначениях расстояние до точки  $A(x, y, z)$  получается из координат ее изображений на видеоматрицах в виде зависимости  $z = b \frac{f}{x_l - x_r}$  [Фортсайт, 2005; Хорн, 1989]. Здесь  $x_l$  и  $x_r$  — координаты точки  $A$  относительно края видеоматрицы. При угле зрения объектива  $90^\circ$  расстояние  $f = M/2$ . Для такого объектива:

$$z = \frac{bM}{2(x_l - x_r)}. \quad (1)$$

Удобство в использовании этой формулы состоит в том, что координаты точки можно измерять в пикселах. При выбранном разрешении видеоматрицы

$$z = b \frac{320}{x_l - x_r}.$$

Из полученной формулы следует, что точность измерения расстояния до объекта пропорциональна стереобазе и разрешению видеоматрицы.

При угле зрения объектива  $90^\circ$  ширина видимой зоны в два раза больше расстояния до стереосистемы. Например, на расстоянии 2 м ширина видимой зоны равна 4 м, при 10...20 м. Отсюда точность измерения формы и размеров объекта пропорциональна разрешению видеоматрицы и расстоянию до него. При разрешении 640 точек и расстоянии до объекта 10 м погрешность определения его размеров составит  $\pm 3$  см, при расстоянии 1 м  $\pm 3$  мм, при расстоянии 20 см —  $\pm 0,6$  мм. На указанном расстоянии объекты меньшего размера с большой долей вероятности могут быть пропущены.

На практике это означает, что тонкий объект мы увидим только вблизи. Например, прут из арматуры диаметром 10 мм заведомо будет виден на расстоянии 3 м, так как разрешение составляет 1 см. Хотя на изображении прут будет выглядеть как ломаная линия, это не мешает идентифицировать его в качестве препятствия.

Таким образом, при разрешении 640 точек удастся своевременно обнаружить препятствия на таком расстоянии, которое соответствует безопасной скорости движения транспортного средства. Указанного разрешения достаточно также для обнаружения в реальном времени препятствия движению манипулятора, которое при транспортных перемещениях достигает 1 м/с. Контроль зоны перемещения позволяет избежать поломки манипулятора и оснастки.

Рассмотрим теперь зависимость точности определения расстояния до объекта от разрешения видеоматрицы. Из (1) находим:

$$\delta z = -\frac{bM}{(x_l - x_r)^2} \delta x.$$

Принимая во внимание (1) имеем:

$$\delta z = -\frac{4z^2}{bM} \delta x.$$

Это равенство показывает, что погрешность в определении дальности зависит только от разности координат и не зависит от положения объекта в поле зрения. Погрешность обратно пропорциональна стереобазе и разрешению матрицы. Следовательно, точность измерения расстояния можно увеличить, например, в два раза путем двукратного увеличения стереобазы или использованием видеоматрицы с в два раза большим разрешением.

Заметим, что погрешность измерения дальности зависит от второй степени расстояния. Вследствие этого ошибка быстро растет с увеличением расстояния до объекта и наоборот быстро уменьшается с его приближением. Эту зависимость можно наблюдать по таблице.

Сдвиг $n$ , пиксел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	16	21	32	64	128	256
Дальность $z$ , м	64	32	21	16	13	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0,5	0,25
Погрешность $p$ , м	$\infty$	16	7	4	2,5	2	1,3	1	0,8	0,5	0,4	0,25	0,15	0,07	0,015	0,004	0,001

В таблице приведены расчеты значений дальности  $z$  в зависимости от смещения точки на видеоматрицах  $x_l - x_r$ , выраженных в пикселах. Дальность вычисляется по формуле  $z = \frac{bM}{2n}$ ,  $n = [x_l - x_r]$ . Погрешность  $p = \frac{bM}{2n^2}$ . Стереобаза  $b = 0,2$  м, разрешение матрицы  $M = 640$  точек. При сдвиге изображения точки в один пиксел ошибка вычисления расстояния может оказаться сколь угодно большой.

Непосредственно из таблицы можно сделать вывод о том, что с помощью стереопары с рассматриваемыми характеристиками возможно измерение расстояний в интервале от 0,25 до 32 м. Погрешность измерения больших расстояний может достигать 50 % (для дальности 32 м).

Расстояния несколько метров измеряются стереосистемой с точностью, достаточной для управления маневрированием транспортного средства. Погрешность составляет 10...20 см. При этом расстояние, проходимое транспортным средством за время сканирования кадра (1/30 с), для скорости 60 км/ч составляет 0,5 м.

Измерение малых расстояний определяется возможностью объектива фокусироваться на близких объектах. Обычные интернет-камеры дают резкое изображение от 0,5 м. Для них близкие расстояния могут быть измерены с точностью 4 мм. Использование короткофокусных объективов или режимов «макро» делает возможным измерение малых расстояний с точностью до 1 мм. За время сканирования кадра манипуляционная система, движущаяся со скоростью 1 м/с, изменит свое положение на 3 см.

Рассмотрение возможностей стереосистемы со стереобазой 20 см и разрешением видеоматриц 640×480 точек показывает, что точность измерения размеров объектов и расстояний до них, достигаемая такой стереосистемой, оказывается достаточной для управления маневрированием транспортных систем на сравнительно больших скоростях. Точность работы такой стереосистемы также достаточна для обеспечения безопасного маневрирования манипуляционных систем при обнаружении непредвиденных препятствий, определения геометрии рабочей зоны в системах автоматического планирования транспортных перемещений и рабочих движений.

### ЛИТЕРАТУРА

[Форсайт, 2005] Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004.  
[Хорн, 1989] Хорн Б. К. П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989.

**INVESTIGATION OF ERRORS IN OBJECT LOCATION  
MEASURING BY STEREOSCOPIC SYSTEM WITH SMALL BASE**

**V. A. Kartashev<sup>1</sup>, S. S. Efimov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Keldysh Institute for Applied Mathematics, RAS (KIAM RAS), Moscow*

<sup>2</sup> *Institute for Information Sciences and Technologies RSGU, Moscow*

The paper investigates measuring accuracy of object location, its form and sizes by stereoscopic system with small base.

*Keywords:* stereoscopic videosystem, investigation of measuring accuracy.

---

**Kartashev Vladimir Alekseevich** — leading scientist, doctor of mathematics, professor, PhD, e-mail: kart@list.ru.

**Efimov Sergey Sergeevich** — student, e-mail: sargikk@mail.ru.

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ И ФИЛЬТРАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ МИКРООБЪЕКТА ПО СТЕРЕОПАРЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПРОЕКЦИЕЙ**

**Д. А. Золотухин, И. В. Сафонов, К. А. Крыжановский**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Министерства образования и науки РФ (НИЯУ МИФИ), Москва*

Приведено описание разработанных алгоритмов, необходимых для трехмерной реконструкции по изображениям с растрового электронного микроскопа (РЭМ). В изображениях, получаемых с помощью РЭМ, проекция параллельная, что требует использования трех изображений для проведения реконструкции. Предложен метод факторизации, позволяющий произвести реконструкцию по двум изображениям и углу поворота предметного столика между ними. Также предложен алгоритм интерполяции поверхности по набору точек в пространстве и фильтрации шумов, проявляющихся в виде «пииков» на поверхности.

*Ключевые слова:* трехмерная реконструкция, параллельная проекция, построение поверхности, облако точек, факторизация масштаба, фильтрация неровностей поверхности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) позволяет получать изображения поверхности микрообъекта с высоким разрешением. Изображения, полученные с помощью РЭМ, обладают свойством параллакса — при наклоне объекта в пространстве (с помощью механизированного предметного столика) его фрагменты на изображении сдвигаются согласно их расстоянию до оптического центра. Это свойство можно использовать для измерения глубины отдельных точек изображения и построения трехмерной формы объекта. Подобная трехмерная форма позволяет анализировать такие свойства поверхности как шероховатость и относительный перепад глубин, а также проводить ее визуальную оценку.

### **ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА**

Свойство параллакса изображений, полученных с помощью РЭМ, позволяет оценить расстояние до отдельных точек микрообъекта, и, следовательно, их глубину. В данном случае целесообразно применение существующих алгоритмов, разработанных для трехмерной реконструкции изображений с цифровых фотоаппаратов. В предлагаемом программном комплексе трехмерная реконструкция проходит в несколько этапов.

---

**Золотухин Дмитрий Александрович** — аспирант, e-mail: dmitri.zolotukhin@gmail.com.

**Сафонов Илья Владимирович** — доцент, кандидат технических наук, e-mail: ilia.safonov@gmail.com.

**Крыжановский Константин Александрович** — старший преподаватель, e-mail: kkryzhanovsky@gmail.com.

### Поиск характеристических точек

На первом этапе выполняется поиск характеристических точек алгоритмом SIFT [Lowe, 2004] на обоих изображениях стереопары.

Затем для каждой найденной точки первого изображения определяется соответствующая ей точка второго изображения, так, чтобы евклидово расстояние между их векторами-дескрипторами было минимальным. Для одной точки может быть найдено несколько соответствующих точек — если расстояние до их дескрипторов одинаково. Если минимальное расстояние до дескриптора соответствующей точки больше  $t = 0,5$ , она отфильтровывается.

### Определение и использование фундаментальной матрицы

На следующем этапе алгоритма методом RANSAC (RANDOM Sample Consensus) определяются пары соответствующих точек, которые удовлетворяют эпиполярному уравнению:

$$x'Fx = 0, \quad (1)$$

где  $F$  — фундаментальная матрица;  $x$  — однородные координаты точки на первом изображении;  $x'$  — однородные координаты соответствующей точки на втором изображении. Проводится выборка  $n = 8$  случайных точек и вычисление по ним фундаментальной матрицы [Hartley, Zisserman, 2003]. Затем отбираются все точки, удовлетворяющие уравнению:

$$D_f = \frac{(x_2^T Fx_1)^2}{(Fx_1)_x^2 + (Fx_1)_y^2} + \frac{(x_1^T Fx_2)^2}{(F^T x_2)_x^2 + (F^T x_2)_y^2} < 10^{-18}, \quad (2)$$

где  $D_f$  — значение ошибки;  $F$  — фундаментальная матрица;  $x_1$  — координата точки на первом изображении;  $x_2$  — координата соответствующей точки на втором изображении. В результате получаем фундаментальную матрицу, соответствующую максимальному набору пар соответствующих точек, оставленных после фильтрации. В предыдущей версии программного комплекса [Золотухин, Сафонов, 2010] по этой фундаментальной матрице проводилось вычисление матриц параллельного переноса  $T$  и взаимного поворота  $R$  для определения взаимного расположения исходных изображений в пространстве. Однако в ходе исследований было определено, что в изображениях, полученных РЭМ, проекция близка к параллельной [Zolotukhin et al., 2011], в результате чего фундаментальная матрица принимает вид:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & b \\ c & d & e \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При вычислении фундаментальной матрицы вместо точных нулей появляется погрешность, а матрицы параллельного переноса  $T$  и взаимного поворота  $R$  вычисляются неточно. Метод, подходящий для цифровых фотоаппаратов и других оптических систем с перспективной проекцией (особенность которого — зависимость размера объекта от его расстояния до оптического центра), при

параллельной проекции вносит погрешность, особенно заметную вблизи начала координат. Чтобы проводить точную трехмерную реконструкцию по изображениям, полученных с помощью РЭМ, алгоритм триангуляции был переделан для использования параллельной проекции.

### Реконструкция с использованием параллельной проекции

За основу был взят метод [Tomasi, Kanade, 1992]. Фундаментальная матрица вычисляется только для фильтрации точек методом RANSAC и в процессе триангуляции не участвует. Данный метод может работать с любым количеством изображений, полученных с помощью параллельной проекции. Не требуется предварительное вычисление взаимного расположения изображений в пространстве. Вместо этого в результате работы алгоритма триангуляции выводится готовый набор точек в трехмерном пространстве. Однако у этого метода есть недостаток: для точной реконструкции необходимо как минимум три изображения, полученных с разных углов наклона предметного столика. В случае двух изображений возникает неоднозначность в разложении матрицы

$$D = A^{-1}A, \quad (4)$$

так как линейных ограничений недостаточно [Tomasi, Kanade, 1992]. Это особенность параллельной проекции: в отличие от перспективной проекции, размеры предмета не изменяются при изменении расстояния от него до оптического центра, и полезной информации в двух изображениях содержится меньше. При использовании данного метода получается 6 уравнений с 9 неизвестными. Для решения неоднозначности возможно использование либо 3 изображений, либо, что более рационально, значение угла наклона. В последнем случае матрица  $D$  примет вид:

$$D = A^{-1}K^{-1}KA, \quad (5)$$

где  $K$  — константа, вычисляемая с помощью минимизации функции

$$G(K) = \sum_{i=1}^P |X_1 \cos(\alpha) - X_2 - \sin(\alpha)KX_{iz}|. \quad (6)$$

На рис. 1 изображена схема, по которой было выведено выражение  $G(K)$  (исходя из подобия треугольников):  $\alpha$  — относительный угол наклона предметного столика в паре изображений;  $X_{iz}$  — безразмерная (относительная) координата  $z$   $i$ -й точки в пространстве, полученная в результате реконструкции;  $X_2$  — проекция точки на втором изображении на прямую, перпендикулярную оси поворота;  $X_1$  — проекция точки на втором изображении на прямую, перпендикулярную оси поворота. При небольшом угле наклона и статистически большом количестве точек за координату  $Z$  можно принять значение  $X_{iz}$ . Функция  $G(K)$  характеризует суммарную погрешность проецирования для заданного значения угла  $\alpha$ . Координаты  $(x, y)$  оси наклона определяются методом минимальных квадратов. При повороте сдвиг проекций точек происходит в направлении, перпендикулярном оси поворота, а значение сдвига уменьшается вместе с приближением точки к оси наклона.

Вычислив значение параметра  $K$ , можно получить набор точек в пространстве

$$S = KA\tilde{S}. \quad (7)$$





Рис. 1. Схема проекции при повороте в плоскости, перпендикулярной оси поворота

### Алгоритм интерполяции и фильтрации шумов

После получения набора точек в пространстве, необходимо построить по ним поверхность. Главная сложность построения — неравномерность расположения точек в пространстве, что не позволяет использовать распространенные алгоритмы интерполяции, рассчитанные на использование декартовой сетки координат. Был опробован алгоритм [Bourke, 1989], выдающий на основании набора точек поверхность, составленную из треугольников с вершинами в координатах исходных точек. Однако при слишком низкой или высокой плотности точек появляются резкие переходы на границах между треугольниками.

За основу улучшенного алгоритма интерполяции взят метод [Arrowsmith, 2006] интерполяции всех точек в окрестности узла сетки координат, обеспечивая ровную поверхность без резких переходов. Взвешенная сумма в окрестностях точки вычисляется по формуле:

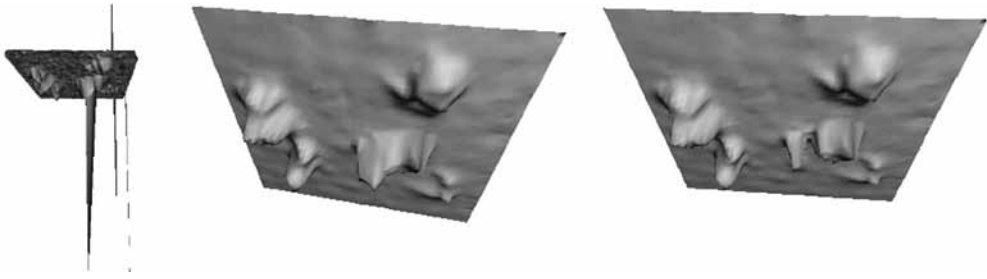
$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (8)$$

где  $Z_i$  — координата  $i$ -й точки, попавшей в окрестность;  $d_i$  — расстояние от центра окрестности до  $i$ -й точки.

Чтобы применить этот метод к набору точек, не привязанных к декартовой сетке координат, проводится рекурсивное разбиение набора. На каждом шаге рекурсии набор точек разбивается на 4 равных прямоугольника, и в каждый отбираются точки, находящиеся на расстоянии

$$r = 5R \quad (9)$$

где  $R$  — радиус описывающей прямоугольник окружности. Точки, расположенные близко к границе прямоугольников, могут относиться к обоим из них. После этого по формуле (9) вычисляется координата  $z$  для прямоугольника по выбранным для него точкам. Для данного прямоугольника повторяется операция



**Рис. 2.** Примеры реконструкции: слева — без фильтра пиков и с интерполяцией треугольниками; в центре — с фильтром пиков,  $t_p = 1,2$ ; справа — с фильтром пиков,  $t_p = 2,0$

разбиения на 4 части. Если после разбиения в какой-то прямоугольник не попало ни одной точки, его координата  $z$  считается равной координате  $z$  «родительского» (до разбиения) прямоугольника.

Таким образом, все точки разбиваются по прямоугольникам, на основе которых строится сетка координат. За координату  $(x, y)$  принимается левый верхний угол прямоугольника, за координату  $z$  — присвоенная координата  $z$  прямоугольника.

Особенность изображений с РЭМ — их низкая контрастность, из-за чего SIFT отбрасывает слишком много точек. Снижение минимальной допустимой контрастности в 4 раза повысило количество отбираемых точек, но вместе с этим потребовало дополнительной фильтрации.

Хотя метод RANSAC и удаляет «ложные» соответствия (когда две точки SIFT считаются соответствующими, но на самом деле такими не являются), некоторые «ложные» точки все же попадают в результат и образуют «пики» (рис. 2). Эти «пики» считаются выбросами, которые можно определить во время интерполяции и сгладить. При вычислении взвешенной суммы, все точки, попавшие в треугольник, сортируются по высоте. Вычисляется их медиана и проводится последовательный перебор точек от минимальной до медианы. До тех пор, пока разница между  $i$ -й точкой и медианой в  $t_p = 2,0$  больше разницы между  $(i + 1)$ -й точкой и медианой,  $i$ -я точка удаляется. Подобное действие удаляет резкие впадины на поверхности. Аналогично удаляются выступы проходом от максимальной высоты до медианы. Значение  $t_p = 2,0$  удаляло все «пики» на тестовых данных, при снижении этого параметра до 1,2 происходило только сглаживание поверхности, что может оказаться полезным для других задач (рис. 2).

После фильтрации «пиков» для точек, которые не были удалены, повторяются операции триангуляции и интерполяции, что позволяет минимизировать ошибку операций вычислений с плавающей точкой, так как сужается диапазон возможных значений глубины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили улучшить алгоритм трехмерной реконструкции, перейти к реальному масштабу для глубины, при этом не требуя знания оптической конфигурации растрового электронного микроскопа или выполнения предварительной калибровки. Разработанный фильтр пиков, совмещенный с алгоритмом интерполяции, устраняет дефекты, не определяемые RANSAC,

а также сглаживает неровности и резкие переходы. Данный алгоритм может работать как в областях с высокой плотностью точек, усредняя их, так и с низкой, интерполируя поверхность плоскими участками по соседним точкам.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Золотухин, Сафонов, 2010] *Золотухин Д. А., Сафонов И. В.* Реконструкция микрообъекта по стереопаре изображений РЭМ с использованием ключевых точек SIFT // 12-я Международ. конф. и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA-2010»: докл. 2010. Т. 2. С. 107–110.
- [Arrowsmith, 2006] *Arrowsmith J. R.* Notes on Lidar interpolation / Arizona State University. May 24, 2006. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://lidar.asu.edu/knowledgebase.html>. (Accessed 08 Jun 2007.)
- [Bourke, 1989] *Bourke P.* Efficient Triangulation Algorithm Suitable for Terrain Modelling // Pan Pacific Computer Conf. 1989.
- [Lowe, 2004] *Lowe D. G.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004.
- [Hartley, Zisserman, 2003] *Hartley R., Zisserman A.* Multiple view geometry in computer vision. Cambridge, 2003.
- [Tomasi, Kanade, 1992] *Tomasi C., Kanade T.* Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method // Intern. J. Computer Vision. 1992. V. 9. N. 2. P. 137–154.
- [Zolotukhin et al., 2011] *Zolotukhin D. A., Safonov I. V., Kryzhanovsky K. A.* Three-Dimensional Reconstruction for Scanning Electron Microscope // Pattern Recognition and Image Analysis. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2011.

## RECONSTRUCTION AND FILTERING OF THREE-DIMENSIONAL MICROOBJECT SHAPES FROM STEREOPAIR IMAGES WITH PARALLEL PROJECTION

D. A. Zolotukhin, I. V. Safonov, K. A. Kryzhanovsky

*National research nuclear university “MEPhI” (NRNU MEPhI), Moscow*

The paper describes algorithms developed for 3D reconstruction from images obtained from a scanning electron microscope (SEM). Images obtained with SEM have parallel projection which required three images or two images with additional factorization. The offered method allows performing reconstruction from two images and the object’s tilt angle value. The article also offers an algorithm for point cloud interpolation and noise filtering for sharp surface “peaks”.

*Keywords:* 3D reconstruction, parallel projection, surface plotting, point cloud, scale factorization, surface irregularity filter.

---

**Zolotukhin Dmitry Alexandrovich** — PhD-student, e-mail: [dmitri.zolotukhin@gmail.com](mailto:dmitri.zolotukhin@gmail.com).

**Safonov Ilya Vladimirovich** — PhD, associate professor, e-mail: [ilia.safonov@gmail.com](mailto:ilia.safonov@gmail.com).

**Kryzhanovsky Konstantin Alexandrovich** — senior lecturer, e-mail: [kkryzhanovsky@gmail.com](mailto:kkryzhanovsky@gmail.com).

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТЕРЕООТОЖДЕСТВЛЕНИЯ, ПОВЫШАЮЩЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Н. Н. Корнева, А. В. Говоров, В. Н. Назаров**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

Рассмотрена возможность, а также приведены практические результаты по созданию автоматизированной системы поиска соответствующих точек (с субпиксельной точностью) пары снимков на основе одного из самых распространенных на сегодня в индустрии развлечений решения для стереовизуализации комплекта 3D Vision Kit компании NVIDIA для видеокарт пользовательского сегмента.

*Ключевые слова:* визуальные стереоскопические измерения; стереомодель; цифровой стереокомпаратор; NVIDIA 3D Vision Kit.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время принцип восстановления трехмерной структуры объекта, а также определение его положения в координатах рабочего пространства с помощью систем стереоскопического технического зрения широко применяется при решении многих прикладных задач научных космических исследований. К наиболее значимым из них относятся зрение роботов, картографирование, конструирование трехмерных моделей объектов.

Ключевая проблема данной области — поиск соответствий по двум изображениям. При этом хорошо известно, что, несмотря на многочисленные попытки создания универсальных методов поиска соответствующих точек на стереопаре, эта задача до сих пор до конца не решена, в виду ее трудности, а также соответствующей сложности общей задачи понимания изображений [Визильтер и др., 2010]. В связи с этим на практике часто возникает необходимость измерения или уточнения полученных аналитическим способом координат соответствующих точек оператором, то есть проведения ручных стереоизмерений.

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СТЕРЕОИЗМЕРЕНИЙ ЦИФРОВЫХ СНИМКОВ**

Один из самых применяемых методов визуальных стереоскопических измерений, позволяющий получить координаты соответствующих точек в системе координат снимка — это способ мнимой марки, предложенный Ф. Штольцем и реализованный К. Пульфрихом при создании оптико-механического прибора, получившего

---

**Корнева Наталья Николаевна** — ведущий программист, e-mail: nkorneva@romance.iki.rssi.ru.

**Говоров Александр Валерьевич** — инженер-программист, кандидат технических наук, e-mail: gff@rambler.ru.

**Назаров Владимир Николаевич** — заведующий лабораторией, e-mail: Vladimir.Nazarov@Cosmos.ru.

название стереокомпаратор. С возникновением и дальнейшим развитием технологии цифровых снимков традиционные стереокомпараторы были заменены их программно-аппаратными аналогами, так называемыми цифровыми стереокомпараторами.

### **Особенности представленных на рынке цифровых стереоизмерительных систем**

В настоящее время практически все представленные на рынке цифровые стереокомпараторы — составная часть дорогостоящих цифровых фотограмметрических станций (ЦФС). Среди наиболее популярных можно выделить: модуль Stereo пакета Leica Photogrammetry Suite (разработчик Leica Geosystems) [LPS Stereo, 2011], ImageStation Stereo Display (разработчик Intergraph) [ImageStation..., 2010], стереокомпаратор фотограмметрического пакета Photomod (разработчик ЗАО «Ракурс») [Photomod..., 2012]. В значительно меньшей степени распространены обособленные программно-аппаратные комплексы.

Для создания стереомодели в этих системах применяется один из следующих способов:

- анаглифический;
- эклипсный;
- зеркальный.

Некоторые из ЦФС поддерживают также поляризационный способ сепарации ракурсов.

Ключевая особенность реализации данных методов — использование специальных аппаратных средств. На практике это почти всегда означает наличие у конечного пользователя специализированных мониторов (исключение составит лишь анаглифический способ сепарации ракурсов), а в случае поддержки системой эклипсного метода и видеокарты профессионального сегмента с поддержкой механизма четверной буферизации (QuadBuffer) API OpenGL или же специализированных контроллеров. Первое требование в основном характерно для стереокомпараторов, входящих в состав ЦФС [LPS Stereo, 2011; ImageStation..., 2010; Photomod..., 2012], второе — для обособленных программно-аппаратных комплексов [StereoPixel..., 2009].

Подобные особенности существенно сужают сферу применимости существующих программных решений в исследовательских и учебных целях, прежде всего в силу их дороговизны. При использовании специализированных контроллеров могут также возникать проблемы, связанные с поддержкой, устареванием, стандартизацией необходимого оборудования. Возможность работы в анаглифическом режиме не решает проблему в связи с тем, что стереомодели, созданные данным методом, обладают рядом существенных недостатков, главный из которых — повышенная утомляемость оператора при проведении визуальных стереоизмерений.

### **Визуальные стереоизмерения на базе комплекта NVIDIA 3D Vision Kit**

Вместе с тем в последнее время на рынке появились не уступающие в качестве, но более доступные по цене аппаратные решения для стереовизуализации на базе эклипсного способа сепарации ракурсов. Так в индустрии развлечений для

видеокарт пользовательского сегмента наибольшее распространение получила технология 3D Vision от NVIDIA. При этом следует заметить, что стоимость монитора, необходимого для реализации эклипсного метода, в среднем в 6...13 раз ниже стоимости зеркальных или поляризационных мониторов, использующихся в представленных на рынке цифровых стереокомпараторах.

Отличительная особенность решения NVIDIA — привязка к конкретному сертифицированному оборудованию, что позволяет гарантировать приемлемое, подтвержденное производителем чипов, качество стереовизуализации — одного из основополагающих факторов, влияющих на точность ручных стереоизмерений, а также уровень утомляемости оператора. К тому же собрать стереосистему на базе технологии NVIDIA проще (по сравнению, например, со схожим решением от AMD) — потребуется лишь купить продукты, совместимые с 3D Vision, и все заработает.

Таким образом, становится очевидным, что формирование стереомодели средствами комплекта NVIDIA 3D Vision Kit для видеокарты пользовательского сегмента позволило бы значительно удешевить программно-аппаратный комплекс с функциями традиционного стереокомпаратора, не снижая при этом точности стереоизмерений. Немаловажным представляется также факт полной технической поддержки решения со стороны производителя.

### **ЦИФРОВОЙ СТЕРЕОКОМПАРАТОР НА БАЗЕ КОМПЛЕКТА NVIDIA 3D VISION KIT**

Описанные проблемы, а также наработки авторов по использованию различных методов стереовизуализации для отображения научной информации космических проектов [Корнева и др., 2012] привели к созданию программного обеспечения, позволяющего осуществлять визуальное стереоскопическое измерение соответствующих точек в системе координат снимка.

#### **Режимы измерения стереопар**

Для измерения и наблюдения цифровых снимков в системе предусмотрено два режима работы:

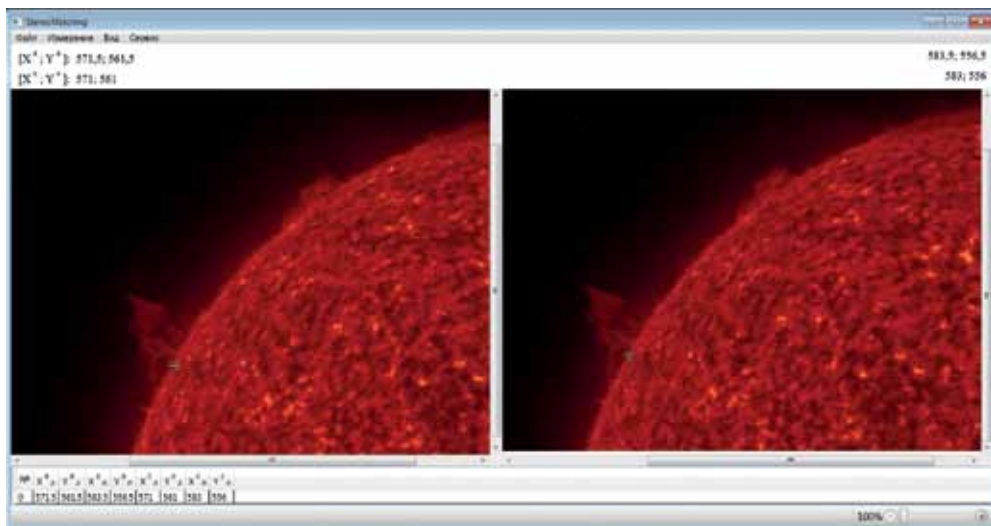
- 2D-режим;
- стереоскопический.

В качестве измерительной марки вне зависимости от способа измерения используется курсор, а координаты и параллаксы точек снимков измеряются в пикселах, представляющих наименьшую единицу измерения, с началом координат в левом верхнем углу изображения.

В 2D-режиме (см. рисунок) на экран выводятся два цифровых снимка, представляющие собой левый и правый ракурсы стереопары. Первоначально пиксел изображения на мониторе соответствует пикселу исходного цифрового снимка, что позволяет посредством мыши навести измерительную марку на точку изображения с точностью до одного пиксела.

В стереоскопическом режиме на экране отображается стереомодель, формируемая из ракурсов стереопары и их измерительных марок. На данный момент в системе реализовано три способа наблюдения стереомодели:

- анаглифический (алгоритм Dubois);



2D-режим цифрового стереокомпаратора (стереопара, полученная зондами-близнецами НАСА STEREO-A и STEREO-B [NASA..., 2008])

- растровый для автостереоскопического дисплея Sharp LL-151-3D;
- эклипсный на базе комплекта NVIDIA 3D Vision Kit для видеокарты пользовательского сегмента.

Для всех трех вариантов сепарации ракурсов вывод стереомодели реализован на основе компонента Direct3D API DirectX 9.0, для эклипсного способа стереовизуализации использовался также стереодрайвер NVIDIA. Следует заметить, что в случае использования конечным пользователем видеокарты NVIDIA профессионального сегмента, а также драйвера 3D Vision программный комплекс не требует доработки.

### Способы измерения стереопар

Совмещение измерительной марки с точкой на изображении может осуществляться одним из двух способов:

- посредством перемещения самой марки;
- параллельного переноса ракурса.

Снимки и измерительные марки могут перемещаться только дискретно соответствующими клавишами клавиатуры. Минимальный шаг перемещения марки составляет один пиксел.

Пиксельные координаты соответствующих точек оператор измеряет способом мнимой марки по следующему алгоритму:

- одним из рассмотренных выше способов марка совмещается с измеряемой точкой на левом или правом ракурсе, на другом снимке точка изображения выбирается оператором произвольным образом, в общем случае выбранные точки не будут соответствующими;
- в стереоскопическом режиме оператор осуществляет совмещение мнимой марки с требуемой точкой видимой модели посредством независимого

перемещения действительных марок или же параллельного переноса самих ракурсов.

Для получения субпиксельной точности в режиме с подвижными марками предусмотрена возможность увеличения ракурсов стереопары. Во втором режиме ракурс стереопары может смещаться относительно неподвижной измерительной марки с шагом меньшим размера пиксела. Для изменения размера пиксела на экране или смещения изображения используется интерполяция.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении научных космических исследований разработанный цифровой стереокомпаратор может применяться для решений тех задач, в которых возникает необходимость измерения и (или) уточнения координат соответствующих точек на стереопаре. Главная область применения данного комплекса (в отличие от стереокомпараторов, входящих в состав ЦФС) — лабораторный эксперимент. В связи с этим основной упор при его разработке делался не только на снижение порога вхождения исследователя в проблематику проведения визуальных стереоскопических измерений, но также на доступность необходимых аппаратных средств пользователю. Под доступностью в данном случае понимается совокупность таких критериев как стоимость аппаратного обеспечения, относительная простота эксплуатации, а также наличие полной технической поддержки со стороны производителя.

Ориентированность разработанного цифрового стереокомпаратора на нужды исследователя, по мнению авторов, позволит повысить эффективность работы над научным космическим проектом, и в перспективе привести к получению более точных и полных моделей исследуемых объектов и явлений. В дальнейшем данный программный комплекс может быть включен в качестве подсистемы в автоматизированную систему поддержки и сопровождения научных космических исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Визильтер и др., 2010] *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В.* Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
- [Корнева и др., 2012] *Корнева Н. Н., Назаров В. Н.* Некоторые аспекты использования технологий стереовизуализации для космических исследований // Сб. тр. научно-технич. конф. «Техническое зрение в системах управления 2011» / Под ред. Р. П. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 68–74.
- [ImageStation..., 2010] ImageStation Stereo Display (Product Sheet). 2010. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.intergraph.com/sgi/downloads.aspx?id=161>.
- [LPS Stereo, 2011] ERDAS IMAGINE and LPS 2011 System Specifications. 2011. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.erdas.com/products/LPS/LPSStereo/ProductLiterature.aspx>.
- [NASA..., 2008] NASA Stereo Studying the Sun in 3D. 2008. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/stereo/multimedia/LeftRightImages.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/multimedia/LeftRightImages.html).



- [Photomod..., 2012] Ракурс. Программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования. 2012. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=531>.
- [StereoPixel..., 2009] StereoComparator (КСК). 2009. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.stereo-pixel.ru/ksk.htm>.

**HUMAN-MACHINE SOLUTION OF STEREO MATCHING PROBLEM  
FOR INCREASING EFFICIENCY OF THE SCIENTIFIC SPACE  
RESEARCHES**

**N. N. Korneva, A. V. Govorov, V. N. Nazarov**

*Space Research Institute (IKI RAN), Moscow*

The article is concerned with the details and problems of developing the software for manual stereo matching (with sub-pixel accuracy) based on one of the most common stereo visualization solutions in game industry Nvidia 3D Vision Kit for the user segment graphic cards.

*Keywords:* visual stereoscopic measurements; stereo model; digital stereo comparator; NVIDIA 3D Vision Kit.

---

**Korneva Natalia Nikolayevna** — principal programmer, e-mail: [nkorneva@romance.iki.rssi.ru](mailto:nkorneva@romance.iki.rssi.ru).  
**Govorov Aleksandr Valerievich** — engineer-programmer, PhD in Technical Sciences, e-mail: [gff@rambler.ru](mailto:gff@rambler.ru).  
**Nazarov Vladimir Nikolayevich**, chief of the laboratory, e-mail: [Vladimir.Nazarov@Cosmos.ru](mailto:Vladimir.Nazarov@Cosmos.ru).

# АЛГОРИТМ МНОГОКАНАЛЬНОГО АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГИСТОГРАММ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ЯРКОСТИ

**Г. Г. Себряков, В. Н. Сошников, И. С. Кикин, А. А. Ишутин**

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»  
(ФГУП «ГосНИИАС»), Москва*

Предложен алгоритм многоканального автосопровождения многоспектральных оптико-электронных изображений наземных объектов, полученный в результате модификации алгоритма, представленного в работах [Себряков и др., 2011а, в]. Модификация заключается в использовании пространственных гистограмм распределения яркости изображений вместо обычных гистограмм распределения яркости. Проведена сравнительная оценка показателей качества автосопровождения изображений наземных объектов в двух спектральных диапазонах с применением модифицированного и исходного алгоритмов.

*Ключевые слова:* алгоритм автосопровождения, способ представления объекта, пространственная гистограмма, поле яркости.

## ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах авторов [Себряков и др., 2011а, в] представлен адаптивный алгоритм многоканального дискриминатора сдвига для решения задачи автосопровождения многоспектральных изображений наземных объектов в бортовой оптико-электронной визирной системе летательных аппаратов. Для вычисления сдвига изображения объекта алгоритм использует ядровую оценку плотности вероятности распределения яркостей точек изображения объекта, формируемую на основе гистограммы распределения яркостей.

Информационная модель наблюдений (ИМН), включающая в себя характеристики полей яркости изображений сопровождаемого объекта, должна обеспечивать заданные требования к показателям качества автосопровождения. В качестве таких показателей в статье рассматриваются точность и время беспрерывного автосопровождения заданного числа объектов (целей). Соотношение уровней значимости указанных требований и выбор ИМН определяется требованиями каждой конкретной задачи.

Можно выделить два концептуально противоположных типа ИМН — гистограммы и шаблоны.

---

**Себряков Герман Георгиевич** — начальник отделения, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, e-mail: sebr@gosniias.ru.

**Сошников Валерий Николаевич** — заместитель начальника отделения, доктор технических наук, e-mail: soshnikov@gosniias.ru.

**Кикин Игорь Сергеевич** — начальник лаборатории, кандидат технических наук, e-mail: kikin@gosniias.ru.

**Ишутин Александр Александрович** — инженер 1-й категории, e-mail: osya.sgrmn@gmail.com.

Для формирования робастных алгоритмов автосопровождения перспективным представляется применение ИМН, объединяющих в себе указанные положительные свойства шаблонной и гистограммной ИМН [Hager et al., 2004; Zhao, Tao, 2005]. Примером такого подхода является пространственная гистограмма [Comaniciu et al., 2003; Collins, 2003; Birchfield, Rangarajan, 2005]. В отличие от обычной, она содержит в себе информацию о координатах точек изображения, яркость которых находится в заданной градации яркостей. Целью работы является сравнение показателей качества автосопровождения при использовании в алгоритмах автосопровождения обычной и пространственной гистограмм.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

*Исходные данные:*

- адаптивный алгоритм многоканального автосопровождения многоспектральных оптико-электронных изображений наземных объектов, представленный в [Себряков и др., 2011а, в] и принятый в качестве прототипа разрабатываемого алгоритма;
- конечные последовательности наблюдаемых кадров изображений фоновой обстановки в нескольких спектральных диапазонах;
- экранные координаты центров и размеры минимальных описывающих прямоугольников (МОП) изображений объектов для начальных кадров заданных последовательностей.

В качестве показателей качества автосопровождения заданы:

- относительное время беспрерывного сопровождения  $K$  объектов —  $T_R(K)$ ;
- среднее отклонение определяемых алгоритмом центров МОП изображений сопровождаемых объектов от истинных —  $e$ .

*Требуется:*

- разработать на основе исходного алгоритма автосопровождения алгоритм автосопровождения, использующий пространственную гистограмму распределения яркости;
- выполнить оценку показателей качества автосопровождения на заданных последовательностях видеок кадров для разработанного и исходного алгоритмов.

## 1. СИНТЕЗ АЛГОРИТМА АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО В КАЧЕСТВЕ ИМН ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ГИСТОГРАММУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ

### 1.1. Принцип решения задачи

Как следует из приведенного выше анализа и постановки задачи, ее решение сводится к модификации исходного алгоритма автосопровождения (прототипа), обеспечивающей применение пространственной гистограммы распределения яркости. Такую задачу целесообразно решать в рамках единой с прототипом структуры алгоритма, сведя ее к модификации отдельных модулей прототипа.

Классическая гистограмма поля яркости заданной области изображения может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{g} = \{g_u\} \text{ для } u = 1, \dots, U, \quad (1)$$

где  $g_u$  — число точек области, значение поля в которых попадает в  $u$ -й интервал разбиения диапазона значений. Такие точки составляют множество  $\mathbf{P}_u$ ;  $U$  — число интервалов разбиения диапазона значений поля (столбцов гистограммы).

Пространственная гистограмма поля яркости заданной области задается следующим образом:

$$\mathbf{s} = \{g_u, \mu_u, \Sigma_u\} \text{ для } u = 1, \dots, U, \quad (2)$$

где  $\mu_u, \Sigma_u$  — соответственно математическое ожидание и матрица ковариации координат точек множества  $\mathbf{P}_u$ ;

Выражение (2) может быть также представлено в виде:

$$\mathbf{s} = \langle \mathbf{g}, \{\mu_u, \Sigma_u\} \rangle \text{ для } u = 1, \dots, U. \quad (3)$$

### 1.2. Алгоритм оценивания межкадрового сдвига центра изображения сопровождаемого объекта одним каналом дискриминатора

Под термином «изображение объекта» здесь и далее имеется в виду область видеокadra, заключенная в минимальный прямоугольник, описывающий изображение сопровождаемого объекта. Вывод формулы для расчета координат центра изображения объекта методом сдвига среднего при использовании пространственной гистограммы распределения яркости изображения объекта осуществляется аналогично случаю классической гистограммы [Себряков и др., 2011а, в].

Пусть  $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m})$  — ядровая оценка на основе пространственной гистограммы ( $\mathbf{Eps}$ ) предполагаемого изображения объекта с центром в точке  $\mathbf{m}$ :  $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m}) = \langle \hat{\mathbf{s}}_0(\mathbf{m}), \mu(\mathbf{m}), \Sigma(\mathbf{m}) \rangle$ , где  $\hat{\mathbf{s}}_0(\mathbf{m}) = \{\hat{s}_u(\mathbf{m})\}$  для  $u = 1, \dots, U$  — ядровая оценка на основе классической гистограммы распределения яркости предполагаемого изображения объекта с центром в точке с координатами  $\mathbf{m}$ :

$$\hat{s}_u(\mathbf{m}) = \frac{1}{C_h} \sum_{i=1}^N K_{E2}(\mathbf{x}_i - \mathbf{m}) K_{E1}(B(\mathbf{x}_i) - u), \quad (4)$$

где  $\{\mathbf{x}_i\}$  для  $i = 1 \dots N$  — множество координат всех точек предполагаемого изображения объекта;  $C_h$  — константа нормализации;  $K_{E1}$  и  $K_{E2}$  — одномерная и двумерная ЯФ Епанешникова соответственно;  $B(\mathbf{x}_i)$  — функция, преобразующая значение поля в точке с координатами  $\mathbf{x}_i$  к индексу соответствующего интервала разбиения гистограммы;

$$\mu(\mathbf{m}) = \{\mu_u(\mathbf{m})\}; \quad \Sigma(\mathbf{m}) = \{\Sigma_u(\mathbf{m})\} \text{ для } u = 1, \dots, U,$$

где  $\mu_u(\mathbf{m}), \Sigma_u(\mathbf{m})$  — соответственно математическое ожидание и матрица ковариации координат точек, значение поля которых соответствуют  $u$ -му интервалу разбиения диапазона значений:

$$\mu_u(\mathbf{m}) = \frac{1}{\sum_{j=1}^N K_{E1}(B(\mathbf{x}_j) - u)} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \mathbf{m}) K_{E1}(B(\mathbf{x}_i) - u);$$

$$\Sigma_u(\mathbf{m}) = \frac{1}{\sum_{j=1}^N K_{E1}(B(\mathbf{x}_j) - u)} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \mu_u(\mathbf{m}))^T (\mathbf{x}_i - \mu_u(\mathbf{m})) K_{E1}(B(\mathbf{x}_i) - u).$$

При использовании пространственных гистограмм мера близости на основе коэффициента Бхаттачарья для оценки **Eps** предполагаемого изображения объекта с центром в точке  $\mathbf{m}$  ( $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m})$ ) и эталонной оценки ( $\hat{\mathbf{r}}$ ) может быть задана следующей формулой:

$$\rho_S(\mathbf{m}) = \rho_S(\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m}), \hat{\mathbf{r}}) = \sum_{u=1}^U \psi_u \sqrt{\hat{\mathbf{s}}_u \hat{\mathbf{r}}_u}, \tag{5}$$

где  $\psi_u$  — пространственный коэффициент для  $u$ -го интервала разбиения диапазона значений поля (столбца гистограммы).

Коэффициент  $\psi_u$  есть мера схожести пространственного размещения множеств точек, соответствующих  $u$ -му диапазону разбиения, для двух сравниваемых ПГ. При сравнении оценок  $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m})$  и  $\hat{\mathbf{r}}$  коэффициент  $\psi_u$  определяется следующим образом [Connaire et al., 2007]:

$$\psi_u = \eta N \left( \mu_u^{(s)}; \mu_u^{(r)}, 2 \left( \Sigma_u^{(s)} + \Sigma_u^{(r)} \right) \right), \tag{6}$$

где  $N(\mathbf{a}; \mu, \Sigma)$  — значение функции плотности вероятности многомерного нормального распределения с параметрами  $(\mu, \Sigma)$  в точке  $\mathbf{a}$ ;  $\mu_u^{(s)}, \Sigma_u^{(s)}$  — значения  $\mu_u, \Sigma_u$  для  $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m})$ ;  $\mu_u^{(r)}, \Sigma_u^{(r)}$  — значения  $\mu_u, \Sigma_u$  для  $\hat{\mathbf{r}}$ ;  $\eta = 8\pi \left| \Sigma_u^{(s)} \Sigma_u^{(r)} \right|^{1/4}$  — нормировочный множитель, обеспечивающий выполнение условий  $0 < \rho_S < 1$  и  $\rho_S(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\mathbf{r}}) = 1$  для любых  $\hat{\mathbf{r}}$ .

Пусть для текущего кадра:  $\mathbf{m}$  — координаты центра предполагаемого изображения объекта;  $\mathbf{m}_0$  — координаты точки, в которой иницируется поиск;  $\hat{\mathbf{r}}$  — эталонная **Eps**.

Осуществляется разложение функции (5) в ряд Тейлора в окрестности  $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{m}_0)$  и дифференцирование результирующей функции по  $\mathbf{m}$ . Путем приравнивания полученного результата нулю с учетом постоянности производной от функции Епанешникова формула для вычисления новых координат предполагаемого центра изображения объекта записывается следующим образом:

$$\mathbf{m}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbf{x}_i - \sum_{u=1}^U \mathbf{v}_u}{\sum_{i=1}^N \alpha_i}, \tag{7}$$

где

$$\mathbf{v}_u = \psi_u(\mathbf{m}_0) \sqrt{\hat{\mathbf{r}}_u \hat{\mathbf{s}}_u(\mathbf{m}_0)} \cdot \hat{\Sigma}_u^{-1}(\mathbf{m}_0) \left( \mu_u^{(r)} - \mu_u^{(s)}(\mathbf{m}_0) \right);$$

$$\alpha_i = \frac{C_{h_2}}{h_2} \sum_{u=1}^U \psi_u(\mathbf{m}_0) \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{r}}_u}{\hat{\mathbf{s}}_u(\mathbf{m}_0)}} \cdot K_{E1}(B(\mathbf{x}_i) - u).$$

Формулу (7) можно записать также следующим образом:

$$\mathbf{m}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i \mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{v}}_i)}{\sum_{i=1}^N \alpha_i}, \quad (8)$$

$$\text{где } \hat{\mathbf{v}}_i = \frac{\sum_{u=1}^U \mathbf{v}_u K_{E1}(B(\mathbf{x}_i) - u)}{\sum_{j=1}^N K_{E1}(B(\mathbf{x}_j) - u)}.$$

### 1.3. Комплексное оценивание межкадрового сдвига геометрического центра изображения сопровождаемого объекта многоканальным дискриминатором сдвига

Для случая нескольких информационных каналов выражение (8) преобразуется к следующему виду:

$$\mathbf{m}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i \mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{V}}_i)}{\sum_{i=1}^N A_i}, \quad (9)$$

где  $A_i = \sum_{f=1}^F \lambda^{(f)} \alpha_i^{(f)}$ ;  $\hat{\mathbf{V}}_i = \sum_{f=1}^F \lambda^{(f)} \hat{\mathbf{v}}_i^{(f)}$ ;  $\lambda^{(f)}$  — весовой коэффициент поля  $f$ ;  $F$  — общее число используемых полей;  $\hat{\mathbf{v}}_i^{(f)}$ ,  $\alpha_i^{(f)}$  — соответственно выражения  $\hat{\mathbf{v}}_i$  и  $\alpha_i$  для поля  $f$ .

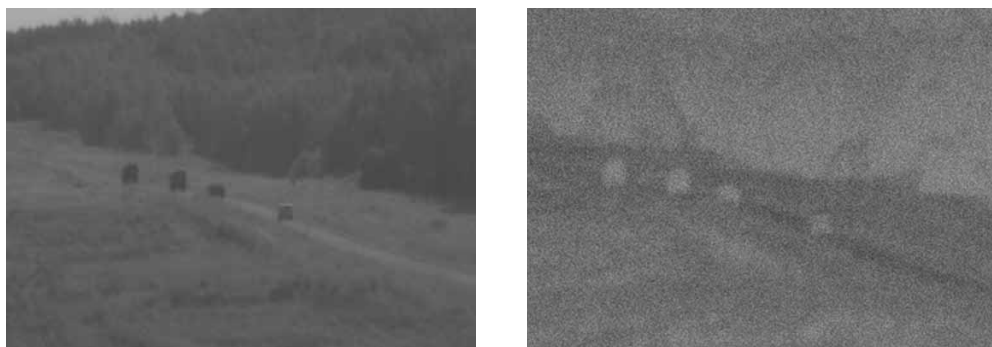
Метод адаптивного определения весовых коэффициентов приведен в работах [Себряков и др., 2011а, в].

## 2. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ

Для оценки показателей качества автосопровождения, представленных в разделе «Постановка задачи», использовались экспериментальные последовательности телевизионных кадров и синтезированные на их основе последовательности тепловизионных кадров. Число сопровождаемых объектов в каждой из последовательностей — 4. Разрешение ТВ-кадров —  $640 \times 480$  пикселей, ТпВ-кадров —  $384 \times 288$  пикселей. Число кадров в последовательностях — 307, 330 и 285 (на каждый из каналов). Частота смены кадров составляла 10 Гц.

На базе трех исходных двухспектральных последовательностей формировались также тестовые последовательности кадров с добавлением аддитивного нормально распределенного пиксельного шума с нулевым МО и значениями дисперсии  $S_N = 0,0015$  и  $S_N = 0,003$ . Пара соответствующих друг другу кадров одной из последовательностей представлена на рисунке.

Значения  $T_R(N)$  рассчитывались для  $N = 4$ . Значения  $e_{cp}$  — осреднением по всем кадрам, входящим в интервал беспрерывного сопровождения данного объекта, и дальнейшим осреднением по всем объектам для данной последовательности кадров. Полученные результаты представлены в таблице.



Кадры одной из последовательностей

Содержащиеся в таблице данные свидетельствуют что модифицированный алгоритм обеспечивает улучшение показателей качества автосопровождения по сравнению с алгоритмом-прототипом.

$S_N$ шума	Алгоритм-прототип			Представленный алгоритм		
	0	0,0015	0,003	0	0,0015	0,003
	$T_R(4)$			$T_R(4)$		
П1	1	0,65	0,42	1	1	0,68
П2	1	1	0,26	1	1	0,29
П3	0,76	0,76	0,37	1	0,81	0,56
	$e_{ср}$			$e_{ср}$		
П1	1,85	1,97	2,45	1,71	1,88	2,01
П2	1,92	2,05	2,52	1,74	1,84	1,94
П3	2,10	2,22	2,27	1,92	1,97	2,07

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе работы [Себряков и др., 2011а] разработан алгоритм адаптивного многоканального автосопровождения, использующий пространственную гистограмму распределения яркости в качестве информационной модели наблюдений. Модифицированный алгоритм обеспечивает (по сравнению с алгоритмом-прототипом) для рассмотренных экспериментальных последовательностей:

- увеличение относительного времени бессрывного сопровождения четырех объектов на тестовых последовательностях в пределах 24...35 %;
- уменьшение среднего значения ошибки локализации сопровождаемого объекта на тестовых последовательностях в пределах 7...12 %.

## ЛИТЕРАТУРА

[Себряков и др., 2011а] Себряков Г. Г., Сошников В. Н., Кикин И. С., Ишутин А. А. Адаптивный алгоритм многоканального дискриминатора сдвига для автоматического сопровождения целей // Вестн. компьютерных и информац. технологий. 2011. № 6.

- [Себряков и др., 2011б] *Себряков Г. Г., Сошников В. Н., Кикин И. С., Ишутин А. А.* Адаптивный алгоритм комплексирования информации для многоканального автоматического сопровождения многоспектральных оптико-электронных изображений наземных объектов: Доклад // 17-я Международ. научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RNLC-2011). Воронеж, 12–14 апр. 2011.
- [Себряков и др., 2011в] *Себряков Г. Г., Сошников В. Н., Кикин И. С., Ишутин А. А.* Многоканальный автомат сопровождения многоспектральных оптико-электронных изображений наземных объектов: Доклад // Юбилейная научно-технич. конф. ГосНИИАС «Моделирование авиационных систем». Москва, 12–14 апр. 2011.
- [Birchfield, Rangarajan, 2005] *Birchfield S. T., Rangarajan S.* Spatiograms versus histograms for region-based tracking // IEEE Computer Soc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2005. P. 1158–1163.
- [Collins, 2003] *Collins R. T.* Mean-shift blob tracking through scale space // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2003.
- [Comaniciu et al., 2003] *Comaniciu D., Ramesh V., Meer P.* Kernel-based object tracking // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. V. 25. N. 5. P. 564–577
- [Connaire et al., 2007] *Connaire C. O., O'Connor N., Smeaton A. F.* An improved spatiogram similarity measure for robust object localisation // ICASSP-2007. IEEE Intern. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing. 2007.
- [Hager et al., 2004] *Hager G. D., Dewan M., Stewart C. V.* Multiple kernel tracking with SSD // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 2004.
- [Zhao, Tao, 2005] *Zhao Q., Tao H.* Object Tracking using Color Correlogram // Proc. 2005 IEEE VSPETS Internat. Workshop. 2005. P. 263–270.

**AN ALGORITHM FOR MULTICHANNEL TRACKING OF GROUND OBJECTS' MULTISPECTRAL OPTOELECTRONIC IMAGES BASED ON SPATIAL BRIGHTNESS HISTOGRAMS**

**G. Sebryakov, V. Soshnikov, I. Kikin, A. Ishutin**

*The Federal State Unitary Enterprise  
“State Research Institute of Aviation Systems”, Moscow*

An algorithm is proposed for automatic tracking of multispectral optoelectronic images of ground objects, which is a modified version of the algorithm presented in [Себряков и др., 2011а, в]. The modification lies in introducing spatial brightness histogram instead of simple brightness histograms. The results of experimental comparative quality evaluation are presented for automatic tracking of ground objects' images in two spectral bands using source and modified algorithms.

*Keywords:* automatic tracking algorithm, object representation model, spatial histogram, brightness field.

---

**Sebryakov German** — head of department, corresponding member of Russian academy of sciences, doctor of science, e-mail: sebr@gosniias.ru.

**Soshnikov Valery** — vice-head of departemnt, PhD, e-mail: soshnikov@gosniias.ru.

**Kikin Igor** — head of laboratory, PhD, e-mail: kikin@gosniias.ru.

**Ishutin Alexander** — engineer, e-mail: osya.sgrmn@gmail.com.



## СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Р. Ш. Зейналов, А. С. Конушин

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
(МГУ), Москва*

На практике встречаются задачи отслеживания объекта с последующими измерениями характеристик его движения. Для их решения часто используются установки, основанные на применении стереопары, с помощью которой снимается движущийся объект, и восстанавливаются координаты точек объекта в каждый момент времени. В работе предлагается использование инфракрасных маркеров, которые помещаются на объект интереса, совместно с камерами, которые снимают в инфракрасном диапазоне. Рассматриваются возникающие при этом проблемы и предлагаются алгоритмы для их решения.

*Ключевые слова:* отслеживание, сопоставление, инфракрасные маркеры, эпиполярные ограничения, триангуляция.

Для решения задач бесконтактных измерений, когда требуется отследить движущийся объект и измерить характеристики его движения, используются системы технического зрения, состоящие из камер, в области видимости которых движется наблюдаемый объект. Можно выделить три принципиально разных подхода. Первый основан на использовании заранее известной трехмерной модели объекта и сопоставлении этой модели с изображением [Weber et al., 2008; Zhao et al., 2007].

Во втором подходе используются методы выделения и отслеживания ключевых точек объекта на его изображении, например с помощью оптического потока или сопоставления дескрипторов особых точек SIFT или SURF [Bay et al., 2008]. Ситуация усложняется, когда объект может быть однородным по цвету: методы перестают работать стабильно. Кроме того, при достаточно быстром движении сложные текстуры могут смазываться, что затруднит отслеживание и ухудшит результаты.

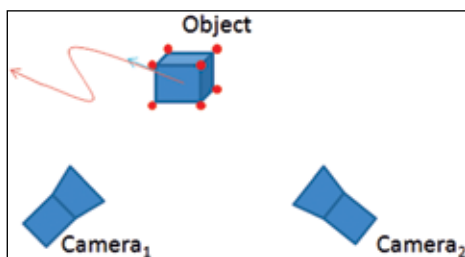


Рис. 1. Схема системы



Рис. 2. Проекция маркеров

---

Зейналов Рамиз Шакирович — аспирант, e-mail: ramiz.zeynalov@gmail.com.  
Конушин Антон Сергеевич — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, заместитель заведующего лабораторией, e-mail: ktosh@graphics.cs.msu.ru.

Третий подход заключается в использовании контрастных маркеров, поиск которых на изображении, как правило, тривиален. Для этого используются инфракрасные маркеры в совокупности с двумя высокоскоростными камерами, которые снимают в инфракрасном диапазоне (см. рис. 1). Инфракрасные маркеры видны на изображениях камер как яркие белые пятна на черном фоне (рис. 2), что значительно облегчает их распознавание.

### КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ

Предлагаемая система нуждается в калибровке. Для этого используется специальный неплоский калибровочный шаблон (рис. 3) и алгоритм его распознавания, который может распознать шаблон даже в случаях, когда он не весь помещается в кадре.

#### Алгоритм распознавания шаблона

Для распознавания шаблона сначала ищется пересечение его основных линий (с удвоенной частотой маркеров) — две горизонтальные и одна вертикальная, которые вместе составляют крест в центре шаблона. Это пересечение ищется как крест, состоящий из пяти точек, наименее удаленных друг от друга. Пусть это будут точки  $P_c$ ,  $P_{right}$ ,  $P_{left}$ ,  $P_{top}$ ,  $P_{bottom}$ . Находятся линии креста — последовательно добавляются ближайшие точки. Затем ищутся точки, которые находятся в тех же строках/столбцах шаблона, что и точки, следующие за  $P_{right}$ ,  $P_{left}$ ,  $P_{top}$ ,  $P_{bottom}$ . Назовем эти точки  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$  начиная с правого верхнего квадранта шаблона по часовой стрелке. Затем берутся вторые точки на этих линиях и вычисляются гомографии из прямоугольника с соотношением сторон 2:1 в четырехугольники, одна сторона которых лежит на вертикальной основной линии между точками, следующими за  $P_{top}$  и  $P_{bottom}$ , а противоположная между точками  $P_1$  и  $P_2$  ( $P_3$  и  $P_4$  соответственно для левой части шаблона). Используя гомографии, получаем следующие точки — сначала прогнозируем их положение, затем уточняем, пытаемся найти ближайшую точку на изображении, если она есть. После каждого такого шага гомографии уточняются. В результате получаем соответствия точек шаблона и точек на изображении. Если хотя бы один из них не выполнен, операция распознавания считается неуспешной.

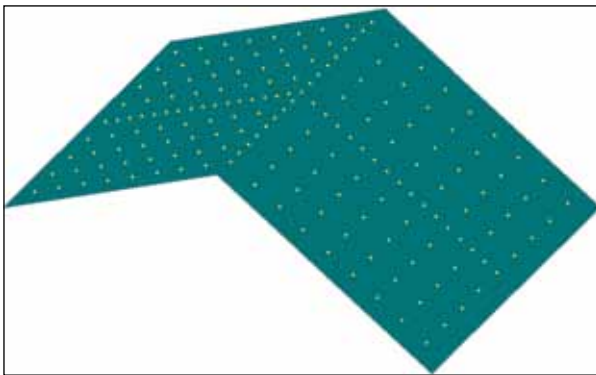


Рис. 3. Калибровочный шаблон

### Вычисление калибровки

Для вычисления калибровки используется метод связок [Triggs et al., 2000], который использует алгоритм Левенберга – Марквардта [Ranganathan, 2004] для вычисления оптимальных значений внутренней и внешней калибровок камеры. При этом минимизируется суммарная ошибка репроекций для каждой камеры отдельно (1) — сумма расстояний от известных проекций до проекций точек шаблона на имеющиеся камеры с учетом их характеристик, которые изменяются в процессе оптимизации. Для этого алгоритма требуется начальное приближение. Первое приближение находится с помощью не итерационного метода DLT [Nitzsche, 1988]:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{cp}} M^{c,i} \left\| p_j^{c,i} - C_{pf}^{-1}(P_j) \right\|^2 \rightarrow \min_c. \quad (1)$$

### СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОЕКЦИЙ

При использовании инфракрасных маркеров вследствие их неотличимости друг от друга возникает задача сопоставления проекций. Она решается в два этапа: межкадрового сопоставления, когда сопоставляются проекции маркеров на одну и ту же камеру на последовательных кадрах, и межвидового, когда сопоставление выполняется на разные камеры как на одной паре кадров, так и на всей последовательности кадров.

#### Межкадровое сопоставление

На входе дается последовательность кадров, которые содержат наборы проекций точек — координат на изображении. Для одной и той же точки в пространстве нет соответствия между ее проекциями на разных кадрах, в то время как для оценки траектории эти соответствия необходимы. Таким образом, требуется восстановить эти соответствия.

Проведенные эксперименты показали, что для получения межкадровых соответствий достаточно использование простого алгоритма, основанного на межкадровом смещении. Ситуации, в которых алгоритм может не сработать, на практике встречаются крайне редко, особенно при малом количестве маркеров.

Введем порог, характеризующий величину допустимого смещения проекции точки на изображении между соседними кадрами. Рассмотрим первый кадр последовательности. Каждой проекции, встречающейся на этом кадре, ставим в соответствие уникальный идентификатор — натуральное число (рис. 4, 6). Точки  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  получают идентификаторы 1, 2 и 3 соответственно. Затем обрабатываем каждый следующий кадр одним и тем же способом: для каждой проекции на предыдущем кадре ищем ближайшую непомеченную проекцию на текущем кадре. Если расстояние между ними (в плоскости изображения) меньше порога — помечаем проекцию на новом кадре тем же идентификатором, что и на предыдущем кадре.

Каждую непомеченную проекцию на новом кадре помечаем новым уникальным идентификатором (рис. 5). Если в какой-то момент для проекции на предыдущем кадре не нашлось проекции на текущем кадре, значит, эта точка только что появилась (см. рис. 5) — точка  $P_4$ .

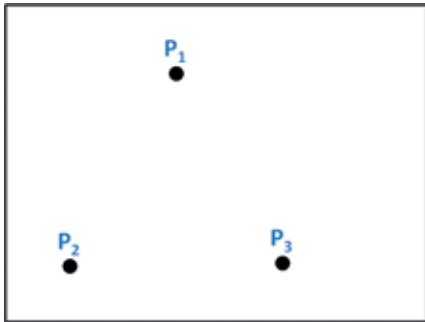


Рис. 4. Первый кадр

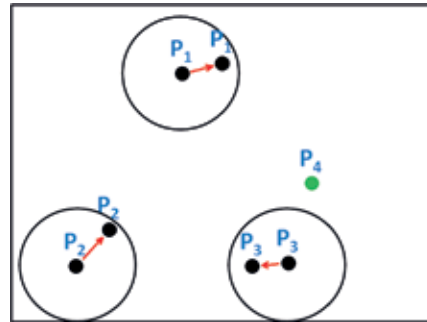


Рис. 5. Второй кадр

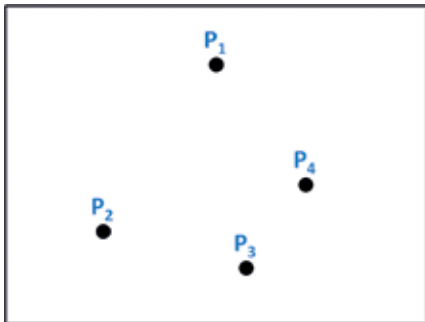


Рис. 6. Первый кадр

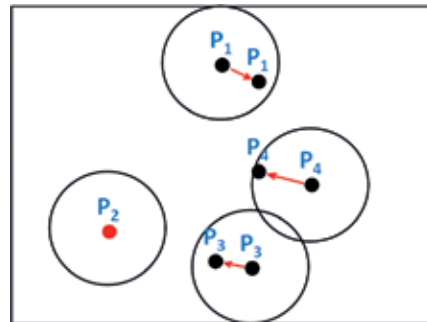


Рис. 7. Второй кадр

Если для какой-то точки на предыдущем кадре не удалось найти точку на текущем кадре, значит, эта точка исчезла (рис. 6, 7) — точка  $P_2$ . Такой алгоритм работает очень быстро, а ситуации, в которых результат работы может быть неверным, крайне маловероятны.

### Межвидовое сопоставление

При использовании несомоидентифицирующихся точечных маркеров возникает задача получения межвидовых соответствий маркеров. Решение этой задачи предлагается на основе использования последовательности кадров с известными межкадровыми соответствиями маркеров (они вычисляются тривиальным алгоритмом) и эпиполярных ограничений [Hartley, Zisserman, 2000]. Для повышения надежности алгоритма используется схема голосования.

Для вычисления межвидовых соответствий используются эпиполярные ограничения (2), которые заключаются в том, что для точки в пространстве ее проекция  $p$  на одной камере ограничивает положение проекции  $q$  той же самой точки на другой камере эпиполярной линией  $l_q$ , которая задается фундаментальной матрицей  $F$ , и наоборот (3).

$$q^T F p = 0, \tag{2}$$

$$\begin{cases} l_q = F p, \\ l_p = q^T F. \end{cases} \tag{3}$$

Алгоритм делится на два слоя — вычисление возможных межвидовых соответствий для одной пары кадров и вычисление межвидовых соответствий для всей последовательности пар кадров. Возможные межвидовые соответствия для кадра вычисляются: для каждой точки  $p_j$  на одной камере выбираются все точки  $\{q_l\}$  на другой камере в окрестности соответствующей эпиполярной линии. Все пары вида  $\langle p_j, q_l \rangle$  добавляются в список возможных соответствий для данной пары кадров. Указанные действия выполняются для всех пар кадров.

Из-за ошибок на отдельных кадрах могут получиться противоречащие между собой множества возможных соответствий. Для того чтобы их избежать, используется схема голосования. Пусть всего разных точек в последовательности кадров одной камеры  $M_1$ , второй —  $M_2$ . Введем матрицу  $MC$ , заполненную нулями. Для каждого соответствия  $\langle p_j^1, p_l^2 \rangle$  каждой пары кадров увеличим на единицу элемент  $MC_{j,l}$  матрицы  $MC$ . В результате в каждом элементе матрицы будет количество голосов за соответствие  $\langle p_j^1, p_l^2 \rangle$ . Чтобы получить множество соответствий для всей последовательности пар кадров будем извлекать максимальный элемент из матрицы  $MC$ , пока в ней есть элементы, значение которых больше порога.

Некоторые точки могли пропасть из вида камер, затем снова появиться. При этом они будут восприняты как новые точки. Для решения этой проблемы рассматриваются отдельные фрагменты объекта, для которых можно построить общую систему координат. Такие фрагменты могут быть объединены, причем указанные выше точки будут совпадать с некоторой точностью. Для этого вводится порог для отождествления таких точек.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ

Для получения угловых скоростей и ускорений требуется знание относительного расположения маркеров, которые могут пропадать из вида одной или обеих камер и снова появляться. Для его вычисления и отождествления пропавших/исчезнувших маркеров предлагается алгоритм, основанный на вычислении их взаимного расположения в системе координат других маркеров и определения взаимного расположения таких систем координат.

Характеристики движения объекта вычисляются как характеристики перемещения и вращения системы координат, связанной с объектом, относительно мировой системы координат. При этом начало системы координат объекта вычисляется как точка, минимизирующая моменты его вращения (4). Полученные зависимости значений характеристик от времени обрабатываются фильтром Калмана [Welch, Bishop, 2001]

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M |r_i| |V^T|. \quad (4)$$

## ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование системы проводилось на статических (вычисление линейных размеров) и динамических тестах (вычисление ускорения свободного падения). Эксперименты показали точность измерения линейных размеров порядка 0,45 %, точность измерения ускорения свободного падения в пределах от 2 до 7 %.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Bay et al., 2008] *Bay H., Tuytelaars T., Gool L. V.* SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding (CVIU'08). 2008. V. 110. N. 3. P. 346–359
- [Hartley, Zisserman, 2000] *Hartley R., Zisserman A.* Multiple view geometry in computer vision. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [Hatze, 1988] *Hatze H.* High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach // J. Biomechanics. 1988. V. 21. P. 533–538.
- [Ranganathan, 2004] *Ranganathan A.* The Levenberg-Marquardt Algorithm 3 LM as a blend of Gradient descent and Gauss-Newton itera // Georgia Tech College of Computing. 2004. P. 1–5.
- [Triggs et al., 2000] *Triggs B., Mclauchlan Ph., Hartley R., Fitzgibbon A.* Bundle adjustment — a modern synthesis // Vision Algorithms: Theory and Practice. LNCS. Springer Verlag, 2000. P. 298–375.
- [Weber et al., 2008] *Weber M., Amor H. B., Alexander T.* Identifying Motion Capture Tracking Markers with Self-Organizing Maps // Virtual Reality Conf. VR'08. IEEE. 2008. P. 297–298.
- [Welch, Bishop, 2001] *Welch G., Bishop G.* An Introduction to the Kalman Filter, 1995. Addison-Wesley ACM Press. Design 7.1. 2001. P. 1–16.
- [Zhao et al., 2007] *Zhao Y., Westhues J., Dietz P., Barnwell J., Nayar S., Inami M., Nol M., Branzoi V., Bruns E.* Lighting Aware Motion Capture using Photosensing Markers and Multiplexed Illuminators // Association for Computing Machinery. Transactions on Graphics (ACM TOG). 2007. V. 26. Iss. 3. Article 36.

### HIGH-SPEED OBJECT MOTION PARAMETERS CONTACTLESS MEASUREMENT SYSTEM

**R. Zeynalov, A. Konushin**

*Lomonosov Moscow State University (MSU)*

Object tracking and motion parameters measurements become a widespread problem. An example of such a problem is moving object experiments, when we need to track the object trajectory and measure its motion parameters. There are some statements of this problem when it is impossible to contact the object during the experiment. To solve this problem stereo pair equipment is being used. The existent solutions are mostly based on point features usage, that are being extracted by SIFT and SURF descriptors. The usage of point features restricts texture and object material to be non-uniform and non-shining. This paper proposes infrared markers usage: the object of interest is covered by set of infrared emissive diodes and it is captured by infrared-range stereo pair camera system. Infrared markers being captured by infrared cameras present as white blobs. So, on the one hand, infrared markers giving point features, in the other hand — the blobs are identical. This fact presents the point matching problem that is considered in this paper. The paper describes a novel solution of the stereo correspondence problem.

*Keywords:* tracking, matching, infrared markers, epipolar constraints, triangulation.

---

**Zeynalov Ramiz Shakirovich** — PhD student, e-mail: ramiz.zeynalov@gmail.com.

**Konushin Anton Sergeevich** — researcher, PhD, deputy head of laboratory, e-mail: ktosh@graphics.cs.msu.ru.

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МОНОФОТОННЫМ УФ-С ДАТЧИКОМ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. А. Белов<sup>1</sup>, В. В. Егоров<sup>2</sup>, А. П. Калинин<sup>3</sup>, И. П. Родионова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр «Реагент»,  
(ЗАО НТЦ «Реагент»), Москва*

<sup>2</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

<sup>3</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук  
(ИПМех РАН), Москва*

<sup>4</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук  
(ИХФ РАН), Москва*

Описана методика и приводятся результаты комплексного анализа изображений коронных и частичных разрядов, получаемых монофотонным сенсором УФ-С «Корона». Методика позволяет проводить дистанционный мониторинг состояния высоковольтных установок. Анализ изображений базируется на использовании Фурье и вейвлет-преобразованиях, а также процедурах вычисления фазовой интегральной характеристики и взаимных корреляционных функций для получения количественных характеристик частичных разрядов, позволяющих судить о степени дефектности элементов высоковольтных установок.

*Ключевые слова:* комплексный анализ, изображение, высоковольтное оборудование, монофотонный сенсор, УФ-С-излучение, коронный разряд, частичный разряд, Фурье и вейвлет-преобразования.

### ВВЕДЕНИЕ

По мере возрастания потребления электроэнергии все более острой становится проблема дистанционного мониторинга линий транспортировки электрической энергии и состояния высоковольтных установок. Увеличение эксплуатационной нагрузки на объекты электроэнергетики, снижение уровня их обслуживания, текущего ремонта и замены изношенного оборудования ведет к возникновению аварийных режимов, сопровождающихся различного рода электрическими пробоями и искровыми разрядами и, в частности, коронным разрядом. Особый интерес представляет задача выделения специфичных типов коронных разрядов — так называемых частичных разрядов, наличие которых свидетельствует о дефектах изоляции высоковольтных установок.

---

**Белов Александр Андреевич** — начальник отдела, e-mail: aabcd@gmail.com.  
**Егоров Виктор Валентинович** — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: victor\_egorov@mail.ru.  
**Калинин Александр Петрович** — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: kalinin@ipmnet.ru.  
**Родионова Ирина Петровна** — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: irodionova@reagent-rdc.ru.

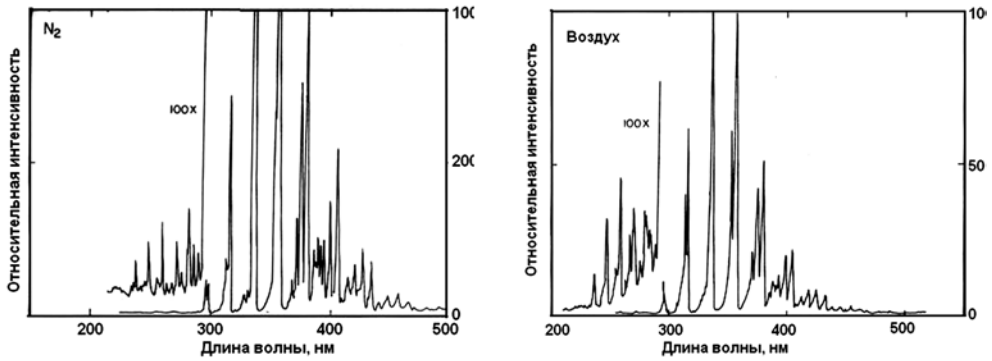


Рис. 1. Спектр излучения коронного разряда

В настоящее время имеется довольно много различных оптико-электронных устройств [Белов и др., 2010а] дистанционного мониторинга состояния высоковольтных устройств, регистрирующих наличие коронного разряда по УФ-С-излучению (250...280 нм). Спектр интенсивностей свечения коронного разряда в азоте и воздухе показан на рис. 1. Несмотря на то, что интенсивность УФ-С-излучения в сотни раз меньше интенсивности свечения на длинах волн 300...400 нм, именно УФ-С-диапазон выбран для использования в дистанционных приборах мониторинга коронного разряда, так как обеспечивает так называемый солнечно-слепой режим работы приборов: земная атмосфера не пропускает излучение Солнца в этом диапазоне.

### ПРИБОР «КОРОНА» И ПОЛУЧАЕМЫЕ ДАННЫЕ

В ЗАО НТЦ «Реагент» разработан прибор «Корона» — универсальный монофотонный сенсор УФ-С диапазона, предназначенный для дистанционного мониторинга высоковольтных установок. Прибор отличается от отечественных и зарубежных аналогов наличием время-координатно-чувствительного детектора, который обеспечивает регистрацию отдельных фотонов и получение угловых и время-амплитудных зависимостей интенсивности УФ-С-излучения. Информация выдается в виде изображений с указанием места источника излучения. Для регистрации фотонов УФ-С-излучения и их координатной и временной привязки используется так называемый время — координатно-чувствительный детектор (ВКЧД). Он обеспечивает регистрацию в режиме счета отдельных фотонов — монофотонный режим. Схема прибора показана на рис. 2, его внешний вид на рис. 3.

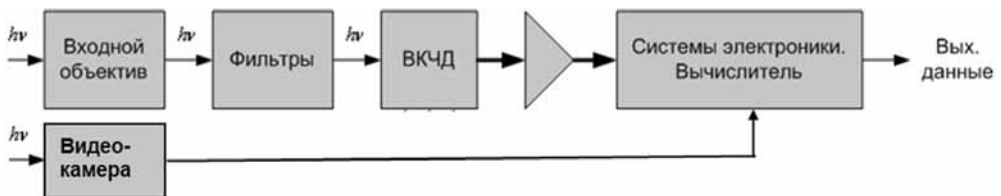


Рис. 2. Блок-схема прибора «Корона»





Рис. 3. Прибор «Корона»

На рис. 4*в* демонстрируется график временной зависимости интенсивности УФ-С излучения, как результат преобразования время-импульсной фотонной информации в амплитудно-импульсную.

сенсоре «Корона» в отличие от прототипа («Скорпион») [Белов и др., 2010б] добавлена видеокамера, установлен объектив с меньшим углом поля зрения и большей светосилой, увеличена чувствительность электронных трактов, а также повышена пропускная способность счетной системы. Это позволило осуществлять совмещение координатной информации ВКЧД с изображением, получаемым синхронизированной цифровой камерой.

На рис. 4 приведены некоторые результаты мониторинга, выполненного сенсором «Корона».

На рис. 4*б* показана картина, полученная путем наложения изображения с видеокамеры и данных с выхода ВКЧД, регистрирующего УФ-С излучение (разными цветами показано свечение коронных разрядов на различных фазах ЛЭП).

### КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МОНОФОТОННЫМ СЕНСОРОМ «КОРОНА»

Комплексный анализ данных с сенсора «Корона» заключался как в получении совмещенной картины данных с ВКЧД и видеокамеры (рис. 4*а*), так и в математической обработке время — импульсной фотонной информации  $\{t_n\}$  от выбранного источника. Эта информация, как было сказано выше, преобразуется в амплитудно-импульсную временную последовательность  $I_n(t)$  путем подсчета фотонных импульсов  $\{t_n\}$  за время  $\Delta t$  по формуле:

$$I_n(t) = \frac{s_n(t, \Delta t)}{\Delta t},$$

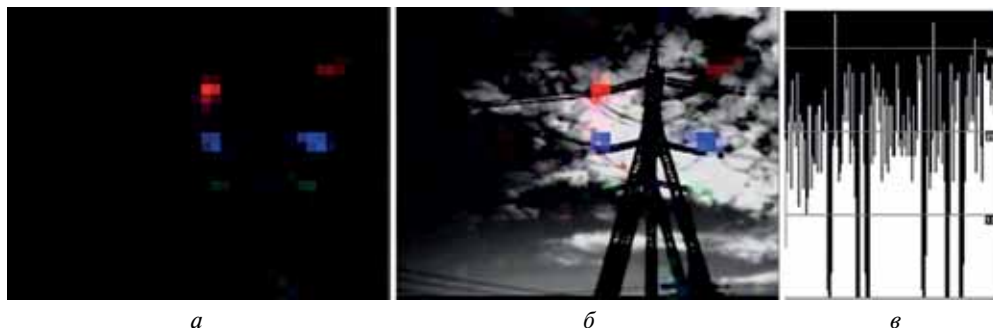


Рис. 4. Результаты мониторинга ЛЭП: *а* — изображение трех источников УФ-С-излучения с ВКЧД; *б* — совмещение изображений с ВКЧД (рис. 4*а*) и видеокамеры; *в* — временной ряд интенсивности УФ-С излучения одного из источников

где  $s_n(t, \Delta t)$  — число фотонов в  $n$ -м временном интервале  $\Delta t$ . Значение амплитуд  $I_n$  сигнала соответствует интенсивности излучения УФ-С источника. Для спектрального представления  $I_n(t)$  в работе применяются преобразование Фурье (ПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) [Блаттер, 2006].

Преобразование Фурье — математическая процедура, которая связывает временной сигнал (или некоторую модель сигнала) с его представлением в частотной области. Это достигается за счет того, что базис преобразования Фурье не локализован во времени, но имеет предельно узкую локализацию в частотной области. Данное обстоятельство делает преобразование Фурье отличным инструментом для изучения процессов, свойства которых не меняются во времени. Поэтому, если применим в нашем случае дискретное преобразование Фурье к последовательности  $I_n(t)$  для чисто коронного разряда, то получим частотный спектр, показанный на рис. 5а. На рис. 5б приведен частотный спектр для случая присутствия в коронном разряде частичных разрядов. Поскольку в частотном спектре присутствует не только основной тон, но и гармоники, то из него нельзя однозначно получить информацию о частоте частотного ресурса (ЧР). Частотные спектры, показанные на рис. 5, позволяют сделать выводы о гармонических составляющих  $I_n(t)$  и, в первую очередь, о частоте переменного тока электросети.

Для получения информации о частоте ЧР использовалось вейвлет-преобразование. В отличие от преобразования Фурье, базисная функция которого жестко задана, вейвлет-преобразование может иметь различные базисные функции или так называемые материнские вейвлеты. В настоящее время разработано около двадцати вейвлетов, например, вейвлет Хаара, «Мексиканская шляпа», вейвлеты Добеши и др., каждый из которых может быть использован в зависимости от поставленной задачи. В данной работе использован комплексный вейвлет Морле, так как он позволял более эффективно выделять всплески, связанные с наличием частичного разряда. Выражение для материнского вейвлета Морле имеет вид:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp\left(2\pi i f_c t - \frac{t^2}{f_b}\right), \quad (1)$$

где  $f_b$  — параметр ширины спектра;  $f_c$  — центральная частота.

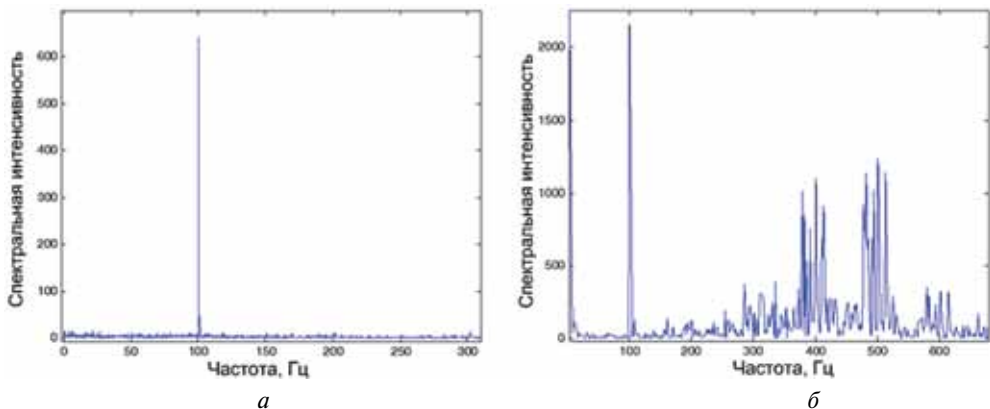


Рис. 5. Частотный спектр сигнала  $I_n(t)$ : а — для чисто коронного разряда; б — для коронного разряда, в котором присутствуют частичные разряды

Из материнского вейвлета может быть сконструировано множество дочерних вейвлетов (или базисов) в соответствии с выражением  $\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ , где  $a$  — масштабный коэффициент;  $b$  — переменная сдвига.

Вейвлет-преобразование описывается выражением:

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

результатом которого является вейвлет-спектр  $W_s(a, b)$ . В отличие от Фурье-спектра, это функция двух аргументов: первый ( $a$ ) (временной масштаб) аналогичен периоду осцилляций, т. е. обратно пропорционален частоте, второй ( $b$ ) аналогичен смещению сигнала по оси времени. Соответствие между масштабными коэффициентами и значениями частоты для вейвлета может быть получено из выражения:

$$f = \frac{f_c}{a},$$

где  $f_c$  — частота дискретизации анализируемого сигнала.

На рис. 6 приведена экспериментально полученная вейвлет-спектрограмма для случая коронного разряда, в котором присутствуют частичные разряды. Из рисунка видно, что значению  $a \approx 50$  соответствует подмножество вейвлетов  $\psi_b(t)$ , спектр которых согласно (1) имеет максимум на частоте  $f \approx 100$  Гц. На рис. 6а можно видеть всплески интенсивности УФ-С излучения, обусловленные колебаниями мгновенной мощности электросети.

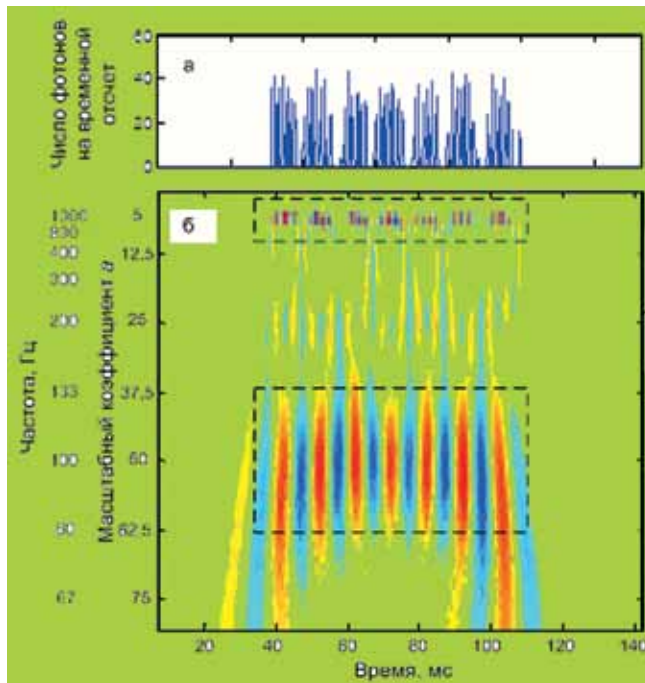


Рис. 6. Всплески интенсивности УФ-С излучения, обусловленные колебаниями мгновенной мощности электросети (а) и его вейвлет-спектрограмма (б)

На рис. 6б нижней пунктирной рамкой выделена область, соответствующая излучению коронного разряда, верхней пунктирной рамкой — область, связанная с присутствием в излучении частичных разрядов.

Значению  $a \approx 5$  соответствуют вейвлеты на частоте  $f \approx 1$  кГц, при котором наблюдаются всплески, связанные с появлением частичных разрядов. Они различимы на графике  $I_n(t)$ , однако не могут быть выявлены на Фурье-изображении по той причине, что все группы стримеров имеют приблизительно равные частоты, но их фазы различны.

Наблюдение всплесков на вейвлет-спектрограмме позволяет лишь визуально определить наличие ЧР, однако для проведения количественных оценок требуется построение дополнительных характеристик: фазовой интегральной характеристики (ФИХ), амплитудного распределения (АР) и амплитудно-фазового распределения (АФР). Они могут быть построены только при наличии временных измерений с сенсора. Для этого устанавливают соответствие между интенсивностью счета фотонов и мгновенной фазой переменного напряжения, обеспечивая создание так называемого механизма фазовой привязки. Результатом фазовой привязки будет последовательность, содержащая мгновенную фазу мощности УФ излучения на выбранной частоте, на основе которой производится построение ФИХ, АР и АФР. Анализируя эти характеристики, определяют относительную интенсивность излучения частичных разрядов в различных фазах, получая, таким образом, качественные и количественные данные УФ-С излучения, характеризующие состояние объекта и, в частности, его изоляции.

Фазовая интегральная характеристика позволяет определить модуль мгновенного напряжения электросети для каждого частичного разряда — основы для вычисления важных параметров, характеризующего коронный разряд: напряжение зажигания и погасания разряда для положительного и отрицательного полупериода напряжения электросети, а также частоты следования ЧР. Известно, что ЧР возникают лишь в некоторой ограниченной части диапазона фазы мгновенной мощности электросети (рис. 7, столбцы с номерами 2, 3, 4, 5). Оставшаяся часть диапазона относится к коронному разряду без ЧР.

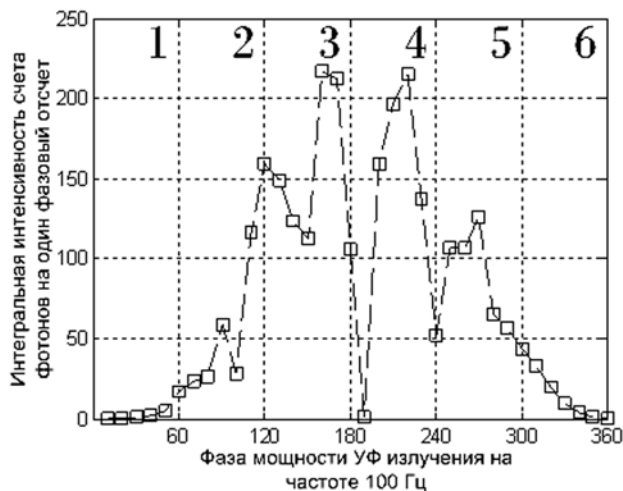


Рис. 7. Фазовая интегральная характеристика интенсивности счета фотонов УФ-С излучения при наличии ЧР

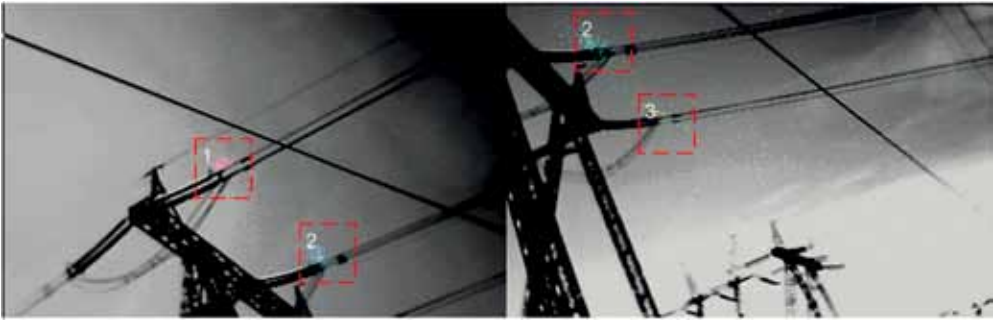


Рис. 8. Совмещения данных ВКЧД и видеокамеры при регистрации фотонов УФ-излучения

Использование датчика излучения с высоким временным разрешением позволяет также проводить дистанционный мониторинг с целью выявления случаев возникновения перекоса фаз. На рис. 8 показано совмещение данных ВКЧД и видеокамеры при регистрации фотонов УФ-С-излучения от опоры ЛЭП.

Наиболее простым методом определения фазового сдвига между двумя слабыми сигналами считается взаимная корреляционная функция (ВКФ). Так как в данном случае стоит задача определения фазового сдвига на частоте 100 Гц, анализируемые сигналы были обработаны цифровыми фильтрами. На рис. 9 приведены три ВКФ, каждая из которых соответствует одной паре зарегистрированных сигналов УФ-С-излучения, относящихся к различным линиям трехфазного тока (см. рис. 3а).

Максимумы на графиках ВКФ соответствуют значению времени, при котором возникает наибольшая взаимная корреляция. Так как данные сигналы периодические, временные отсчеты могут быть пересчитаны в угловые единицы фазового сдвига. Вычисленные фазовые сдвиги приведены в таблице.

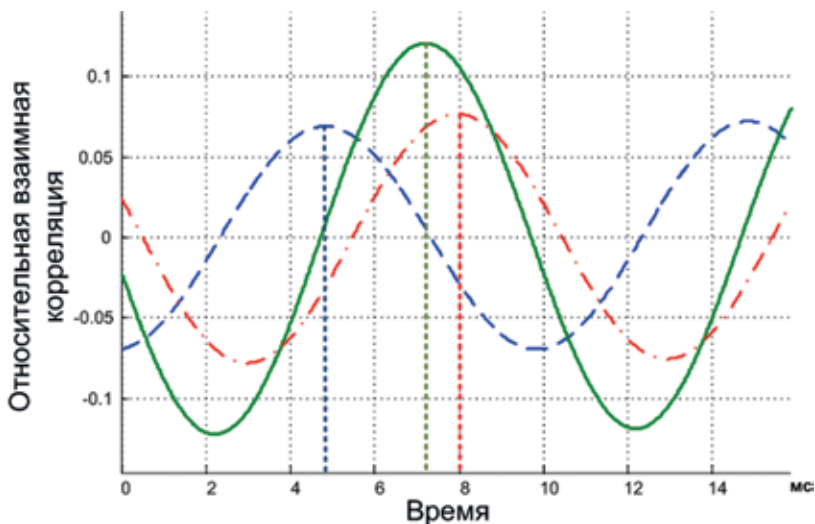


Рис. 9. ВКФ сигналов трех источников УФ-С излучения

Вычисленные фазовые сдвиги  $\varphi$ 

Обозначение	Линия на графике (рис. 9)	Временное смещение, мс	Значение фазового сдвига, град	Нормальные значения фазового сдвига, град
$\varphi_{12}$	Штриховая	4,9	87	120
$\varphi_{23}$	Сплошная	7,2	130	120
$\varphi_{13}$	Штрихпунктирная	8,0	144	120
Контрольная сумма			361	360

Из таблицы видно, что фазовые сдвиги между сигналами значительно отличаются от нормальных значений (перекос фаз), что указывает на неправильный режим передачи электроэнергии. В общем случае причиной перекоса фаз на ЛЭП сверхвысокого напряжения может быть неравное распределение нагрузки по фазам и/или плохое состояние изоляции.

Правильность метода вычисления фазовых сдвигов подтверждается равенством  $\varphi_{12} + \varphi_{23} + \varphi_{31} = 361^\circ$  с точностью до одного углового градуса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика, базирующаяся на регистрации и комплексном анализе изображений с монофотонного сенсора УФ-С излучения «Корона», позволяет оперативно диагностировать состояние элементов высоковольтных установок переменного тока. В том числе проводить дистанционную диагностику ЛЭП в рабочем состоянии с получением визуальной картины свечения УФ-С источников на высоковольтных элементах электроустановок, а также частоты следования и повторения импульсов ЧР, их фазного угла, перекоса фаз и др.. Анализ частотных характеристик УФ-С излучения коронного разряда позволяет делать не только качественные выводы, но и проводить количественные оценки этих характеристик, что исключительно важно, поскольку они связаны с состоянием исследуемых элементов электроустановок.

На разработанный метод дистанционной диагностики получен патент [Белов и др., 2010в].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-02-13107-офи-м-2011-РЖД).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Белов и др., 2010а] Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А. П., Крысюк И. В., Осипов А. Ф., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н. Универсальный монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона: Препринт ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН. М.: ИПМех РАН, 2010. № 935. 48 с.
- [Белов и др., 2010б] Белов А. А., Калинин А. П., Крысюк И. В., Порохов М. А., Родионов А. И., Родионов И. Д., Русанов В. В. Монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона «Скорпион» // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 47–50.
- [Белов и др., 2010в] Белов А. А., Калинин А. П., Крысюк И. В., Родионов И. Д., Родионов А. И., Степанов С. Н. Способ дистанционного контроля качества изоляции объектов высоковольтных электрических установок переменного тока. Патент № 2402030 от 12.10.2009. Оpubл.: 10.10.2010 в Бюл. № 29.
- [Блаттер, 2006] Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории: учебное пособие. М.: Техносфера, 2006. 272 с.

**COMPLEX ANALYSIS OF IMAGES RECEIVED BY MONOPHOTON  
UV-C SENSOR FOR REMOTE SENSING STATE PROBLEMS  
OF THE HIGH VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT**

**A. A. Belov<sup>1</sup>, V. V. Egorov<sup>2</sup>, A. P. Kalinin<sup>3</sup>, I. P. Rodionov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre (R&D “Reagent”), Moscow*

<sup>2</sup> *Space Research Institute (IKI RAN), Moscow*

<sup>3</sup> *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences  
(IPMech RAS), Moscow*

<sup>4</sup> *Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences  
(IChPh RAS), Moscow*

The method and results of coronal and partial discharges received by monophoton UV-C sensor “Korona” are described. This method permits to realize remote sensing state problems of the high voltage electrical equipment. The image analysis is based on the Fourier and wavelet transforms as well as calculation of the phase integral characteristics and mutual correlation functions. It allows to conclude about degree of the high voltage equipment elements imperfection.

*Keywords:* complex analysis, image, high voltage electrical equipment, monophoton sensor, UV-C radiation, coronal discharge, partial discharge, Fourier and wavelet transforms.

---

**Belov Alexander Andreyevich** — chief of division, e-mail: aabcd@gmail.com.

**Egorov Victor Valentinovich** — senior researcher, candidate of science, e-mail: victor\_egorov@mail.ru.

**Kalinin Alexander Petrovich** — leading researcher, PhD, senior researcher, e-mail: kalinin@ipmnet.ru.

**Rodionova Irina Petrovna** — senior researcher, candidate of science, e-mail: irodionova@reagent-  
rdc.ru.





## **Секция 4**

# **МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

## МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ БЫСТРЫХ ДВУМЕРНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ НА ЭТАЛОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

А. Ю. Дорогов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ)*

Предлагается метод настройки быстрых двумерных ортогональных преобразований, основанный на идеях фрактальной фильтрации. Настройка выполняется за конечное число шагов, которое определяется числом множителей в мультипликативном разложении размерностей преобразования. Настроенное преобразование в качестве одной из базисных функций содержит эталонное изображение. Наличие быстрого алгоритма обеспечивает высокую скорость обработки данных. Приведены примеры.

*Ключевые слова:* быстрый алгоритм, спектральные методы обработки изображений, фрактальная фильтрация, сжатие изображений.

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для обработки изображений используются ортогональные преобразования, обладающие быстрыми алгоритмами. Цель обработки обычно заключается в фильтрации или сжатии изображения. Для решения задачи сжатия необходима статистическая информация о классе изображений, чтобы без особых потерь для восприятия удалить малозначимые компоненты сжимаемых отображений. Для этого обычно применяются ортогональные косинусные и вейвлет-преобразования, базисные функции которых близки к собственным векторам ковариационных матриц класса изображений. Сами векторы, упорядоченные в матрицу, образуют ортогональное преобразование Карунена – Лоэва. К сожалению, это преобразование не имеет быстрого алгоритма и поэтому не используется при больших размерностях данных. Однако его важная отличительная особенность — возможность обучения по статистически накопленным данным.

Подобное качество можно распространить и на быстрые преобразования, поставив цель настроить значения коэффициентов базовых операций таким образом, чтобы учесть априорную информацию и сохранить при этом условие ортогональности. Быстрые преобразования имеют меньшее число степеней свободы, чем преобразование Карунена – Лоэва, поэтому возможности обучения будут ограничены. Тем не менее, их достаточно чтобы настроиться, по крайней мере, на одну главную компоненту преобразования Карунена – Лоэва. Это позволит решать целый класс задач, связанных с эффективным сжатием, адаптивной фильтрацией и распознаванием образов.

Ортогональное преобразование, которое настроено на одну базисную функцию называется приспособленным. Для приспособленных преобразований этап обучения существенно упрощается. В случае составной размерности для их реализации можно использовать параметрически настраиваемый класс быстрых алгоритмов, за которым исторически закрепилось название «перестраиваемые быстрые

преобразования» [Солодовников, 1986]. Быстрые алгоритмы основаны на возможности факторизации преобразования в произведение слабозаполненных матриц, каждую из которых можно интерпретировать как слой нейронной сети. Это обстоятельство сближает класс перестраиваемых преобразований с нейронными сетями. Термин «ортогональные нейронные сети» последнее время достаточно часто используется в научных публикациях.

Задачи построения быстрых приспособленных ортогональных преобразований для одномерных сигналов исследовались автором в работах [Дорогов, 2002, 2004а]. В данной статье предлагается способ построения быстрых приспособленных преобразований для двумерных сигналов — изображений.

### ДВУМЕРНЫЕ БЫСТРЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Обозначим через  $F(U_y, U_x)$  матрицу изображения размерностью  $N_y \times N_x$ . При воздействии на изображение линейного преобразования  $H(U_y, U_x; V_y, V_x)$  получается массив из  $M_y \times M_x$  коэффициентов. Двумерное преобразование выполняется по правилу:

$$S(V_y, V_x) = \sum_{U_y=0}^{N_y-1} \sum_{U_x=0}^{N_x-1} F(U_y, U_x) H(U_y, U_x; V_y, V_x). \quad (1)$$

Двумерное преобразование называется ортогональным (точнее унитарным) если выполняется условие:

$$\sum_{U_y=0}^{N_y-1} \sum_{U_x=0}^{N_x-1} H(U_y, U_x; V_y, V_x) \bar{H}(U_y, U_x; V'_y, V'_x) = \begin{cases} 1, & \text{если } V_y = V'_y \text{ и } V_x = V'_x, \\ 0, & \text{если } V_y \neq V'_y \text{ или } V_x \neq V'_x, \end{cases} \quad (2)$$

где символом надчеркивания « $\bar{\phantom{x}}$ » помечено комплексно-сопряженное преобразование. Для ортогонального преобразования выполняется:  $N_y = M_y, N_x = M_x$ . Необходимое условие существования быстрого алгоритма — возможность мультипликативной декомпозиции значений обоих размерностей изображения в равное число сомножителей:

$$N_y = p_0^y p_1^y \dots p_{n-1}^y, \\ N_x = p_0^x p_1^x \dots p_{n-1}^x.$$

Индексы  $x, y$  означают принадлежность к осям координат исходного изображения. Данное условие не является особенно жестким ограничением, поскольку некоторые сомножители могут быть единичными. Тем не менее, чем больше число неединичных сомножителей, тем выше вычислительная эффективность быстрого алгоритма. Используя сомножители декомпозиций, координаты точек изображения представим в позиционной системе счисления со смешанными основаниями:

$$U_y = \langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \dots u_1^y u_0^y \rangle, \\ U_x = \langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \dots u_1^x u_0^x \rangle, \quad (3)$$

где вес  $m$ -го разряда определяется выражением  $p_{m-1}^* p_{m-2}^* \dots p_1^* p_0^*$ , а  $u_m^*$  — разрядной переменной, принимающей значения  $[0, p_m^* - 1]$  (звездочка здесь заменяет

индексы  $x, y$ ). Аналогично можно представить координаты спектральных коэффициентов в плоскости  $[V_y, V_x]$ :

$$V_y = \langle v_{n-1}^y v_{n-2}^y \dots v_1^y v_0^y \rangle,$$

$$V_x = \langle v_{n-1}^x v_{n-2}^x \dots v_1^x v_0^x \rangle.$$

Алгоритм быстрого преобразования обычно представляется в виде графа с различной топологией. Поразрядную форму удобно использовать для описаний топологий быстрого алгоритма. Например, для топологии «Кули – Тьюки с прореживанием по времени» граф может быть описан в виде лингвистического предложения:

$$\left[ \begin{array}{c} \langle u_{n-1}^* u_{n-2}^* \dots u_1^* u_0^* \rangle \langle u_{n-1}^* u_{n-2}^* \dots u_1^* v_0^* \rangle \dots \\ \dots \langle u_{n-1}^* u_{n-2}^* \dots u_{m+1}^* u_m^* v_{m-1}^* v_{m-2}^* \dots v_0^* \rangle \dots \langle v_{n-1}^* v_{n-2}^* \dots v_1^* v_0^* \rangle \end{array} \right].$$

Первое и последнее слово предложения соответствуют координатам значений в пространственной и спектральной области. Число слов в предложении равно  $n + 1$ . Промежуточные слова определяют координаты  $U_y^m, U_x^m$  и  $V_y^m, V_x^m$  для точек преобразуемого изображения во внутренних слоях быстрого алгоритма. Для алгоритма с замещением значений выполняется условие:

$$U_y^{m+1} = V_y^m, \quad U_x^{m+1} = V_x^m. \quad (4)$$

По топологическому предложению несложно построить граф быстрого преобразования [Дорогов, 2002]. В общем случае топологии для направлений  $x$  и  $y$  могут быть разными. На граф топологии в слое  $m$  накладываются базовые операции  $W_{i_x^m, i_y^m}^m \left( u_m^y u_m^x; v_m^y v_m^x \right)$ , представляющие собой четырехмерные матрицы размерности  $\left[ p_m^y, p_m^x; p_m^y, p_m^x \right]$ . Взаимосвязь между базовыми операциями определяется фактор-графом, который называется структурной моделью быстрого преобразования. Для выбранной топологии граф структурной модели описывается лингвистическим предложением:

$$\left[ \begin{array}{c} \langle u_{n-1}^* u_{n-2}^* \dots u_1^* \rangle \langle u_{n-1}^* u_{n-2}^* \dots u_2^* v_0^* \rangle \dots \\ \dots \langle u_{n-1}^* u_{n-2}^* \dots u_{m+1}^* v_{m-1}^* v_{m-2}^* \dots v_0^* \rangle \dots \langle v_{n-2}^* v_{n-3}^* \dots v_1^* v_0^* \rangle \end{array} \right].$$

Каждое слово в этом предложении определяет номер базовой операции  $i_*^m$  в слое  $m$ . Число слов в предложении равно  $n$ . На рис. 1 показана структурная модель быстрого двумерного преобразования для размерности изображения  $8 \times 8$ . Входное изображение поступает на нижний слой, а спектральные коэффициенты получаются в верхнем слое. Вершинам модели соответствуют базовые операции (иначе называемые ядрами). Ядро в слое  $m$  выполняет двумерное преобразование над пространственным блоком размером  $p_m^y \times p_m^x$ :

$$S^m \left( V_y^m, V_x^m \right) = \sum_{u_m^y} \sum_{u_m^x} F^m \left( U_y^m, U_x^m \right) W_{i_*^m, i_*^m}^m \left( u_m^y u_m^x; v_m^y v_m^x \right). \quad (5)$$

Соответствия  $U_*^m \leftrightarrow \left( i_*^m, u_*^m \right)$  взаимно однозначно определяются по лингвистическим предложениям топологической и структурной моделей.

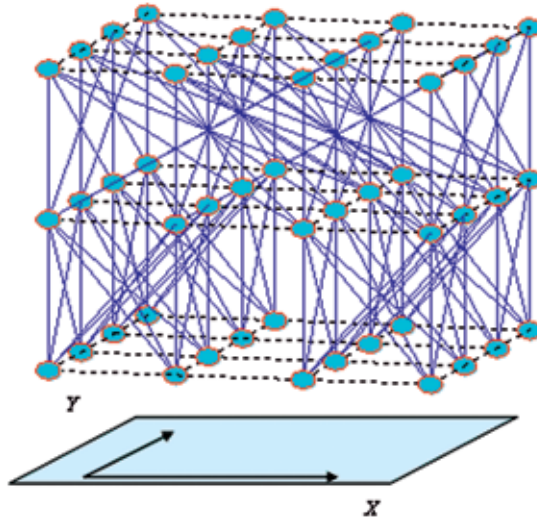


Рис. 1. Структурная модель двумерного быстрого преобразования

### МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Задание конкретных значений для всех разрядных переменных  $u_m^*, v_m^*$  (где  $m$  пробегает значения  $0, 1, \dots, n - 1$ ) определяет некоторый путь в топологическом графе между парой элементов начального и конечного слоев. Из однозначности  $m$ -разрядного представления чисел следует, что такой путь единственный для каждого парного сочетания пространственных точек входного и выходного слоев. Это обстоятельство позволяет получать удобное аналитическое выражение, связывающее элементы матрицы быстрого преобразования с элементами ядер. Из выражения (1) следует, что

$$H(U_y, U_x; V_y, V_x) = \frac{\partial S(V_y, V_x)}{\partial F(U_y, U_x)}. \quad (6)$$

Дифференцируя уравнение (6) по правилу дифференцирования сложной функции получим:

$$H(U_y, U_x; V_y, V_x) = \frac{\partial S^{n-1}}{\partial F^{n-1}} \frac{\partial F^{n-1}}{\partial S^{n-2}} \frac{\partial S^{n-2}}{\partial F^{n-2}} \dots \frac{\partial F^1}{\partial S^0} \frac{\partial S^0}{\partial F^0}.$$

Из условия (4) следует, что для всех  $m$  имеет место  $\frac{\partial F^m}{\partial S^{m-1}} = 1$ , а из условия (5) имеем  $\frac{\partial S^m}{\partial F^m} = W_{i_x^m, i_y^m}^m (u_m^y u_m^x; v_m^y v_m^x)$ . Таким образом, получим, что каждый элемент четырехмерной матрицы преобразования  $H$  выражается через элементы ядер в виде произведения:

$$H(U_y, U_x; V_y, V_x) = W_{i_x^{n-1}, i_y^{n-1}}^{n-1} (u_{n-1}^y u_{n-1}^x; v_{n-1}^y v_{n-1}^x) W_{i_x^{n-2}, i_y^{n-2}}^{n-2} (u_{n-2}^y u_{n-2}^x; v_{n-2}^y v_{n-2}^x) \dots W_{i_x^0, i_y^0}^0 (u_0^y u_0^x; v_0^y v_0^x), \quad (7)$$

где поразрядные выражения индексов ядер слоя  $m$  для выбранной топологии имеют вид:

$$i_x^m = \langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \dots u_{m+1}^x v_{m-1}^x v_{m-2}^x \dots v_0^x \rangle, \quad i_y^m = \langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \dots u_{m+1}^y v_{m-1}^y v_{m-2}^y \dots v_0^y \rangle. \quad (8)$$

Если подставить выражение (7) в условие ортогональности (2), то получим, что оно будет выполнено, когда ортогональными являются все ядра, т. е. для любых  $m, i_x^m, i_y^m$  имеет место:

$$\sum_{u_m^y} \sum_{u_m^x} W_{i_x^m, i_y^m}^m \left( u_m^y u_m^x; v_m^y v_m^x \right) \bar{W}_{i_x^m, i_y^m}^m \left( u_m^y u_m^x; v_m^y v_m^x \right) = \begin{cases} 1, & \text{если } v_m^y = \bar{v}_m^y \text{ и } v_m^x = \bar{v}_m^x, \\ 0, & \text{если } v_m^y \neq \bar{v}_m^y \text{ или } v_m^x \neq \bar{v}_m^x. \end{cases}$$

### ОБУЧЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ БЫСТРЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Алгоритм обучения основан на идеях фрактальной фильтрации, которые были первоначально развиты для одномерных сигналов [Дорогов, 2004б]. Для двумерного случая фрактальная фильтрация представляет собой кратно-масштабную обработку изображений, последовательно сжимающую его размеры вплоть до единственной точки. Схему фрактальной фильтрации можно представить в виде пирамиды, показанной на рис. 2. Основание пирамиды — исходное изображение  $F(U_y, U_x)$ , для которого аргументы  $U_y$  и  $U_x$  представлены в позиционной системе счисления (3). В этом позиционном представлении зафиксируем все разряды кроме двух младших  $u_0^y$  и  $u_0^x$ . Если варьировать эти разряды по всем возможным значениям, то получим выборку размером  $p_0^y \times p_0^x$ . Под фрактальным фильтром будем понимать произвольный функционал  $\Phi$ , заданный на этой выборке. Формально фильтр можно записать в виде выражения:

$$F_1 \left( \langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \dots u_1^y \rangle, \langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \dots u_1^x \rangle \right) = \Phi_{(u_0^y, u_0^x)} \left[ F \left( \langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \dots u_1^y u_0^y \rangle, \langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \dots u_1^x u_0^x \rangle \right) \right].$$

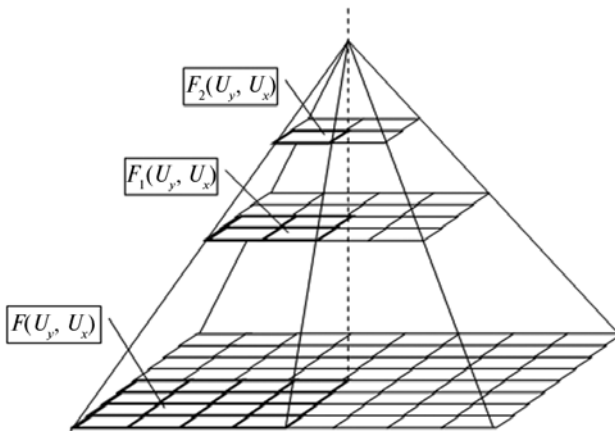


Рис. 2. Схема фрактальной фильтрации изображений

Очевидно, что изображение  $F_1$  будет кратно уменьшенным по размерам по отношению к исходному изображению. Функционалом, например, может быть правило вычисления среднего значения выборки или ее медианы. Исходное изображение теперь формально представим в виде произведения:

$$F\left(\left\langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \cdots u_1^y u_0^y \right\rangle, \left\langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \cdots u_1^x u_0^x \right\rangle\right) = F_1\left(\left\langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \cdots u_1^y \right\rangle, \left\langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \cdots u_1^x \right\rangle\right) f_{j_0^y j_0^x}\left(u_0^y, u_0^x\right),$$

где  $f_{j_0^y j_0^x}\left(u_0^y, u_0^x\right)$  — набор двумерных функций-множителей, зависящих от разрядных переменных  $u_0^y$  и  $u_0^x$ , а индексы  $j_0^y, j_0^x$  выделяют функцию из набора. Значение этих индексов устанавливается равным значениям аргументов изображения  $F_1$ , т. е.  $j_0^y = \left\langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \cdots u_1^y \right\rangle$  и  $j_0^x = \left\langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \cdots u_1^x \right\rangle$ . Для получения функций множителей достаточно выполнить скалярное деление изображения  $F$  на изображение  $F_1$  при варьировании всех разрядных переменных. Изображение  $F_1$ , в свою очередь, может быть представлено как произведение изображения  $F_2$  на множители из набора  $f_{j_1^y j_1^x}\left(u_1^y, u_1^x\right)$ . Повторяя операцию фрактальной фильтрации и разложения многократно, достигнем вершины пирамиды изображений и получим мультипликативную декомпозицию:

$$F\left(\left\langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \cdots u_1^y u_0^y \right\rangle, \left\langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \cdots u_1^x u_0^x \right\rangle\right) = f_{j_{n-1}^y j_{n-1}^x}\left(u_{n-1}^y, u_{n-1}^x\right) f_{j_{n-2}^y j_{n-2}^x}\left(u_{n-2}^y, u_{n-2}^x\right) \cdots f_{j_1^y j_1^x}\left(u_1^y, u_1^x\right) f_{j_0^y j_0^x}\left(u_0^y, u_0^x\right), \quad (9)$$

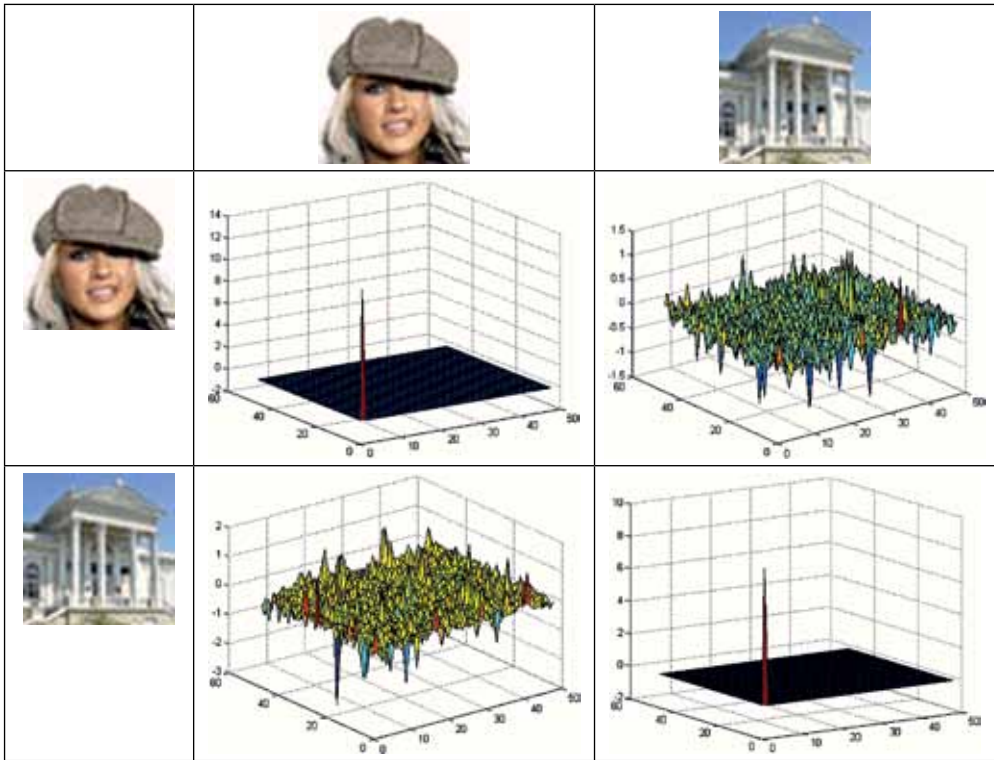
где  $j_m^y = \left\langle u_{n-1}^y u_{n-2}^y \cdots u_{m+1}^y \right\rangle$  и  $j_m^x = \left\langle u_{n-1}^x u_{n-2}^x \cdots u_{m+1}^x \right\rangle$ .

Если сравнить полученную декомпозицию изображения с декомпозицией быстрого преобразования (7), то нетрудно заметить, что они подобны. Причем множество индексов ядер в каждом слое покрывает множество индексов функций-множителей. Отсюда следует конструктивный вывод, что быстрое преобразование будет приспособлено к изображению, когда функции — множители разложения (9) приспособлены к ядрам. Фактически для каждой двумерной функции-множителя нужно достроить ортогональные функции до полного набора базисных функций ортогонального ядра. Это можно легко сделать, используя алгоритм ортогонализации Грамма-Шмидта [Беллман, 1976]. Недостающие по количеству ядер наборы функций-множителей могут быть дополнены их повторением.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов для двух изображений представлены на рис. 3. Цветные изображения преобразовывались к черно-белому варианту и из них вычиталась постоянная составляющая. Для каждого изображения было построено быстрое приспособленное преобразование. Это преобразование использовалось для обработки собственного и чужого изображения. На рис. 3 представлены двумерные спектры для обоих случаев.

**Спектры тестовых изображений**



**ЛИТЕРАТУРА**

- [Беллман, 1976] *Беллман Р.* Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1976. 352 с.
- [Дорогов, 2002] *Дорогов А. Ю.* Быстрые нейронные сети. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2002. 80 с.
- [Дорогов, 2004а] *Дорогов А. Ю.* Методы настройки быстрых перестраиваемых преобразований // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2004. № 7–8. С. 17–32.
- [Дорогов, 2004б] *Дорогов А. Ю.* Быстрые нейронные сети: Проектирование, настройка, приложения: Лекции по нейроинформатике. Ч. 1 // Тр. шк.-семинара «Современные проблемы нейроинформатики». Науч.-техн. конф. «Нейроинформатика-2004». 28–30 янв. 2004. М.: МИФИ, 2004. С. 69–135.
- [Солодовников, 1986] *Солодовников А. И., Сливаковский А. М.* Основы теории и методы спектральной обработки информации. Л.: 1986, 272 с.

**PARAMETRICAL TUNING METHOD OF TWO-DIMENSIONAL FAST ORTHOGONAL TRANSFORMATION TO IMAGE SAMPLE**

**A.Yu. Dorogov**

*Saint Petersburg State Electrotechnical University LETI (SPbGETU)*

Parametrical tuning method for fast two-dimensional orthogonal transformation which is based on fractal filtering is suggested. The tuning is carried out throw finite amount of steps, which is equal to number factors of multiplicative decomposition



of image dimensionality. Tuned transformation contains image sample as one of basis functions. Presence of fast algorithm provides high rapidity of image processing. Examples are shown.

*Keywords:* Fast algorithm, spectral method of image processing, fractal filtering, image compression.

---

**Dorogov Alexander Yurievich** — professor, doctor of science, docent, e-mail: vaksa2006@yandex.ru.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. П. Богданов, Ю. Н. Романов

*Открытое акционерное общество «Государственный  
Рязанский приборный завод» (ОАО «ГРПЗ»), Рязань*

Рассматриваются вопросы объективной оценки качества цифровых изображений. Предлагается метод оценки качества на основе выбора и объединения субъективных частных критериев и численных характеристик, полученных на основе статистического анализа изображений. Приведены результаты работы программного пакета оценки качества цифровых изображений, которые подтверждают эффективность предлагаемого подхода.

*Ключевые слова:* цифровая обработка изображений, визуальное качество, объективные метрики, интегральный показатель, локальные значения контраста и значение сигнал/шум.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание аппаратных средств цифровой обработки изображений (ЦОИ) для обзорных и обзорно-прицельных оптико-электронных систем (ОЭС) особенно актуально при работе в ненормированных условиях наблюдения, на предельных дальностях и требует проведения этапа полунатурного моделирования по оценке эффективности разрабатываемого алгоритмического обеспечения. Оценка эффективности разрабатываемых средств ЦОИ выполняется усредненной оценкой группы операторов качества выполнения ОЭС своих конечных функций (дальность обнаружения и распознавания, время и вероятность обнаружения, количество обнаруженных целей и т. д.). При этом оценивается весь тракт ОЭС «датчик-монитор» получения и визуализации видеоданных. На практике часто не представляется возможным воссоздать полностью весь канал визуализации ОЭС до начала испытаний объекта техники. В связи с этим возникает необходимость в проведении сравнительной оценки эффективности преобразования каждого функционального оператора ЦОИ на основе анализа результирующих цифровых изображений. Методики и испытательные изображения, применяемые в телевизионной технике, направлены на верификацию телевизионных трактов сжатия и передачи видеоданных. При этом изображения получены в студийных условиях, а методики ориентированы на измерения параметров аналогового телевизионного сигнала [Кривошеев, 1989]. Поэтому они — малоэффективны при оценке качества преобразований функционально-ориентированных систем ЦОИ, решающих задачи улучшения видения для визуального обнаружения и распознавания целей в ОЭС.

В работе сделана попытка нахождения связи субъективных критериев оценки качества визуализируемых изображений с объективными численными характеристиками цифрового изображения, получаемыми математическим аппаратом статистического анализа.

---

Богданов Аркадий Петрович — старший научный сотрудник, e-mail: hunter-rzn@yandex.ru.

Романов Юрий Николаевич — заместитель директора научно-конструкторского центра — главный конструктор по направлению, e-mail: hunter-rzn@yandex.ru.

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК

В настоящее время существует несколько методик объективной оценки качества изображений, основанных на формализации субъективного восприятия. Широко используются критерии, основанные на сравнении изображения-оригинала (эталона) и преобразованного изображения по среднеквадратической ошибке или сравнении отношений сигнал/шум двух изображений, а также их варианты [Moorthy et al., 2010]. Эти методики актуальны для оценки качества алгоритмов и аппаратуры передачи телевизионных изображений и минимизации вносимых ухудшений (шумов, искажений, других дефектов) и имеют простое математическое описание.

Для оценки качества обработки изображений, неизвестной сюжетной составляющей и низкого визуального качества, используется единственно достоверный метод экспертных оценок [Кривошеев, Федунин, 2007]. Методология подхода базируется на общепринятых шкалах, имеющих бальную оценку, с точки зрения субъективного восприятия качества изображения (рекомендация МККР ВТ.500-11), вносимых ухудшений (рекомендация МККР ВТ.813) или возможности выполнения по предъявленному изображению функциональной задачи (обнаружение, распознавание или идентификация) [Филатов и др. 2007]. Его основными недостатками считается: трудоемкость, значительные материальные затраты и невозможность использования результатов оценки для коррекции цифровой обработки в реальном времени. Предлагаемая методика должна интегрировать объективные численные характеристики, заменяющие субъективные критерии качества, а вычисления должны выполняться в реальном темпе поступления изображений.

## МОДЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В качестве модели изображения предпочтительной будет модель, основанная на материалах работы [Чочиа, 1988] и учитывающая статистические связи элементов изображения:

- кусочно-гладкую фоновую компоненту, определяющую средние уровни яркости в каждой точке изображения, а также задающую контурные перепады и форму протяженных объектов на изображении;
- высокочастотную текстурную компоненту, несущую информацию о текстуре и мелких деталях изображения;
- случайный шум.

Такое представление анализируемого изображения учитывает психофизические особенности зрительного восприятия и совпадает с данными об эффективности визуального поиска [Травникова, 1985]. Первая фоновая компонента модели влияет на общее восприятие изображения и решение задачи обнаружения, в то время как влияние двух последних становится существенным при решении задачи распознавания или при работе автоматических систем. Первоначально формализуем фоновую компоненту изображения, несущую низкочастотную составляющую в изображении. На рис. 1 приведены изображения среднего и хорошего визуального качества, а также характеристики «иконического» представления телевизионного полноформатного изображения ( $768 \times 576$  элементов разложения при 256 уровнях яркости) системы визуализации ОЭС.

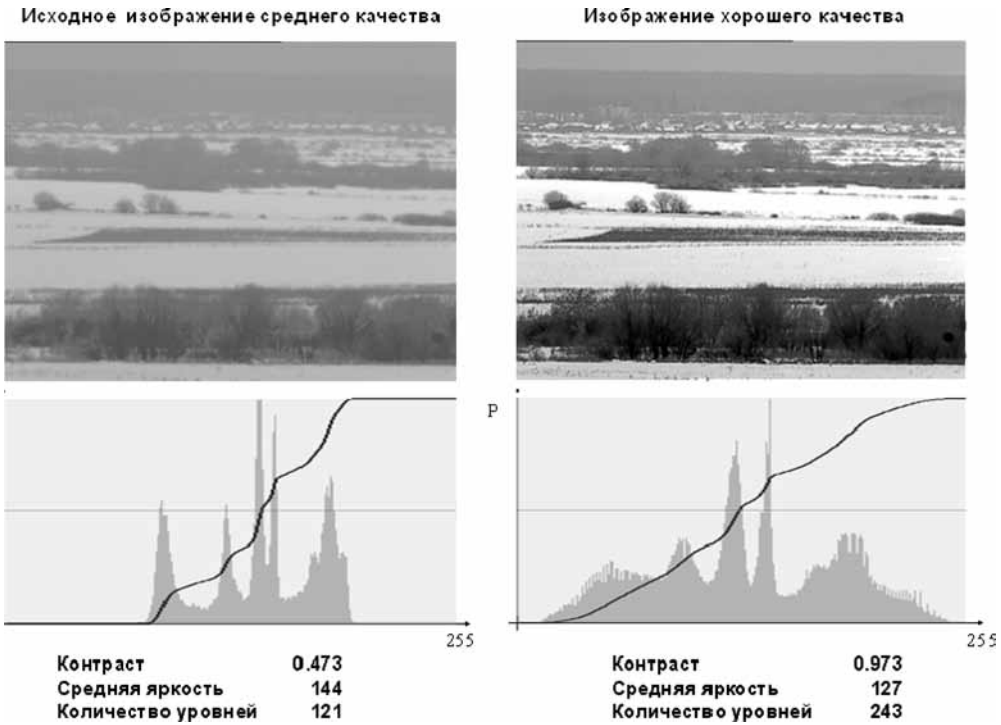


Рис. 1. Изображения среднего и хорошего визуального качества, их гистограммы и основные характеристики

### ВЫБОР ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Одна из главных проблем при формализации оценки зрительного восприятия — установление связи между объективными отдельными характеристиками (метриками) изображений и субъективными критериями качества восприятия. Известные подходы представления универсального индекса качества (УИК) изображения [Wang, Bovik, 2002] и структурного подобия [Moorthy, Bovik, 2009] ориентированы на нахождение сходства исходного изображения с преобразованным и эффективно работают в основном для оценки алгоритмов кодирования изображений.

Универсальный индекс качества оценивает искажения преобразованного изображения как комбинацию трех факторов: потери корреляции, искажений яркости и контраста. Дальнейшее развитие индекса качества учитывает и структурное подобие изображений. Несмотря на то, что индексы математически определены и показывают достаточную последовательность оценок с субъективным качественным измерением, никакая человеческая визуальная модель системы при этом не используется.

Индексы позволяют оценить качество изображения значительно лучше, чем широко используемые методы, основанные на вычислении среднеквадратической ошибки и отношения сигнала к шуму. Однако для оценки алгоритмов повышения информативности изображений, ориентированных на улучшение психофизического восприятия, индексы дают неоднозначные результаты.

Исходное		Контрастирование			
	Контраст	0,149		Контраст	1,0
	Кол-во уровней	39		Кол-во уровней	39
	Средняя яркость	68,0		Средняя яркость	98,0
	СКО	5,817		СКО	38,930
	Энтропия	4,408		Энтропия	4,408
	Глобальный сигнал/шум	33,63		Глобальный сигнал/шум	34,00
	Эквализация			Шаблон нормальный	
	Контраст	1,0		Контраст	0,973
	Кол-во уровней	34		Кол-во уровней	36
	Средняя яркость	135,0		Средняя яркость	133,0
	СКО	73,615		СКО	53,231
	Энтропия	4,398		Энтропия	4,406
Глобальный сигнал/шум	18,35	Глобальный сигнал/шум	21,29		
УИК	0,117	УИК	0,167		

Рис. 2. Примеры обработки изображений разными операторами повышения контраста и численные характеристики изображений

На рис. 2 приведены результаты повышения контраста распространенными операторами яркостной предобработки и основные численные характеристики преобразованных изображений. Исходное изображение имеет плохое визуальное качество, затемнено. На изображении плохо различимы объекты, как заднего, так и переднего плана. После линейного преобразования яркости контраст становится максимальным, меняется значение средней яркости, возрастает значение среднеквадратического отклонения яркости (СКО) при неизменном количестве информационных уровней. Можно выделить отдельные объекты фона, в целом визуальное качество улучшается. После процедуры преобразования гистограммы по равномерному закону — «эквализации» становятся различимы объекты на заднем плане, что обеспечивается возросшими значениями контраста, средней яркости и СКО.

Недостатками преобразованного изображения представляется чрезмерный сюжетный контраст и потеря некоторого количества уровней. В результате плохо различимы фрагменты изображения, как на светлом, так и на темном фонах. Более предпочтительным яркостным преобразованием будет изменение гистограммы по шаблону [Богданов и др., 1998], нормирующее среднюю яркость, повышающее контраст и сохраняющее большее количество информационных уровней. Значения частных показателей подтверждают и лучшее визуальное качество. Хорошо различимы как объекты заднего, так и переднего планов, при уверенном обнаружении объекта на фоне подстилающей поверхности изображения.

Из анализа приведенных численных характеристик изображений, приведенных на рис. 2, отношение сигнал/шум, кроме наличия на изображении ярко выраженного структурного шума, в меньшей степени влияет на визуальное восприятие изображений для оператора за счет временной суммации человеческого глаза. Качество зрительного восприятия определяется главным образом энергетическими характеристиками сигналов, поступающих к оператору [Травникова, 1985]. К ним относятся, в частности, такие параметры как диапазон и количество воспроизводимых яркостей, контраст объект/фон. Объективными показателями этих параметров зрительного анализатора будут контраст ( $K$ ) и количество информационных уровней ( $N$ ) соответственно. Количество градаций яркости

(в отличие от принятого телевизионного понятия) характеризует количество различных информационных уровней, присутствующих в изображении, и определяется по гистограмме изображения:

$$G(M_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } M_i = 0; \\ 1, & \text{если } M_i > 0, \end{cases}$$

где  $M_i$  — количество точек, яркость которых равна  $i$ .

В поле зрения оператора одновременно могут попадать предметы разной яркости. Для оценки яркости объектов в этом случае используется понятие адаптирующей яркости. Она определяется как средневзвешенное значение яркостей, попадающих в поле зрения. За счет адаптации осуществляется настройка зрительного анализатора на эту яркость. Этой характеристике можно сопоставить

среднюю яркость изображения  $\bar{L} = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^W L_{xy}}{HW}$ , где  $H, W$  — высота и ширина изображения;  $L_{xy}$  — яркость элемента текущего изображения с координатами  $x$  и  $y$ .

Для количественной оценки качества изображений используются такие объективные характеристики как среднеквадратическое отклонение (СКО) и энтропия. СКО адекватно понятиям контрастности и, в какой-то мере, четкости. Энтропия — мера количества информации в изображении.

Задача интегральной оценки качества изображений носит многокритериальный характер, поэтому вводится обобщенный критерий качества ( $F$ ) следующего вида:

$$F = \sum_{i=1}^p \beta_i f_i, \quad (1)$$

где  $\beta_i$  — весовые коэффициенты;  $f_i$  — частные критерии;  $p$  — количество частных критериев.

Данный обобщенный критерий будет аддитивным. Применение представленного варианта обобщенного критерия возможно только в том случае, если все частные показатели качества имеют одинаковую размерность. Для этого необходимо определить пределы изменения параметров и нормализовать их. Причем, чем меньше эта величина, тем хуже показатель. Контраст — это нормализованный параметр  $K_n = \frac{(L_{\max} - L_{\min})}{255}$ .

Максимальное число информационных уровней в визуализированных цифровых изображениях  $N = 256$ . Следовательно, нормализованное значение примет вид  $N_n = \frac{N}{256}$ .

Экспериментальным путем получено, что СКО изменяется в пределах от 0 до 100, а оптимальным значением будет 50:

$$\sigma_n = \begin{cases} \frac{\sigma}{50}, & \text{если } \text{СКО} \leq 50, \\ \frac{(100 - \sigma)}{50}, & \text{если } \text{СКО} > 50. \end{cases}$$

Для нормализованного значения средней яркости предпочтительны значения принадлежащие середине диапазона. На границах яркостного диапазона ее значение минимально:

$$L_n = \begin{cases} \frac{\bar{L}}{128}, & \text{если } \bar{L} \leq 107; \\ \frac{(255 - \bar{L})}{128}, & \text{если } \bar{L} > 147; \\ 1, & \text{если } \bar{L} \in (107 \dots 147). \end{cases}$$

Энтропия изображения, имеющего диапазон от 0 до 255 градаций яркости, не может превышать 8. Нормированное значение энтропии примет вид  $\hat{a}_n = \hat{a}/8$ .

Основную сложность применения частных показателей представляет собой выбор весовых коэффициентов, учитывающих влияние соответствующих частных показателей на обобщенный критерий в целом. Для выбора значений этих коэффициентов обычно используется метод экспертных оценок. Для рассматриваемого функционала весовые коэффициенты были отобраны экспериментальным путем на основе исследования характеристик изображений различной семантики и разного субъективного качества. Частные критерии можно разбить на группы по приоритетам:  $(L, \sigma)$ ;  $(L, N)$  и  $(\epsilon)$ . Энтропия стоит на последнем месте вследствие ее наименьшего влияния на визуальное качество изображения. Весомость вклада СКО в значение интегрального показателя функции качества объясняется его смыслом и способностью в некоторой степени учитывать сильный шум. В дальнейшем показатели были выстроены по убыванию влияния внутри уже выделенных приоритетных групп.

Весовые коэффициенты для функционала (1) определяются по критерию Фишберна [Фишберн, 1978]  $\beta_i = \frac{2(p_i + 1)}{p(p + 1)}$ .

С учетом изложенного, интегральный показатель качества (ИПК) низкочастотной яркостной составляющей изображения примет вид:

$$\text{ИПК} = 0,33L_n + 0,27\sigma_n + 0,20K_n + 0,13N_n + 0,07\epsilon_n. \tag{2}$$

### ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КРИТЕРИЯ

Рассмотрим работу критерия на конкретном примере, проанализировав частные характеристики и интегральный показатель качества изображения до и после обработки по разным алгоритмам улучшения визуального качества (рис. 3).

Имеется исходное изображение плохого визуального качества, сильно затемненное. Преобразованные изображения имеют заметно лучшее визуальное качество. При этом полученное преобразованием по алгоритму 2 более предпочтительно для восприятия за счет более контрастной проработки деталей и значение



Рис. 3. Примеры обработки изображений разными алгоритмами улучшения видения

ИПК выше. При сравнении сложности вычислительной реализации алгоритмов 1 и 2, а также по значению ИПК можно на этапе моделирования уверенно принять решение об эффективности выбираемого алгоритма.

### ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТ – ФОН

Важными характеристиками, с точки зрения выполнения системой ЦОИ основных функций (обнаружение, распознавание и автоматическое сопровождение) считаются локальное значение контраста объекта относительно фона и локальное отношение сигнал/шум, вычисленные по зоне интереса, содержащей объект и окружающий фон.

Контраст объект – фон или локальный контраст, вычисленный в окрестности объекта и прилегающего фона,  $k = \frac{\overline{L_o} - \overline{L_f}}{\overline{L_f}}$  — это отношение разностей средних яркостей объекта (яркость, усредненная по площади объекта) и прилегающего фона (яркость, усредненная по площади фона) к средней яркости фона.

Отношение сигнал/шум (с/ш) или локальное значение сигнал-шум, вычисленное по изображению объекта  $c/\text{ш} = \frac{\overline{L_o} - \overline{L_f}}{\sigma_{\text{ш}}}$  — отношение разностей средних

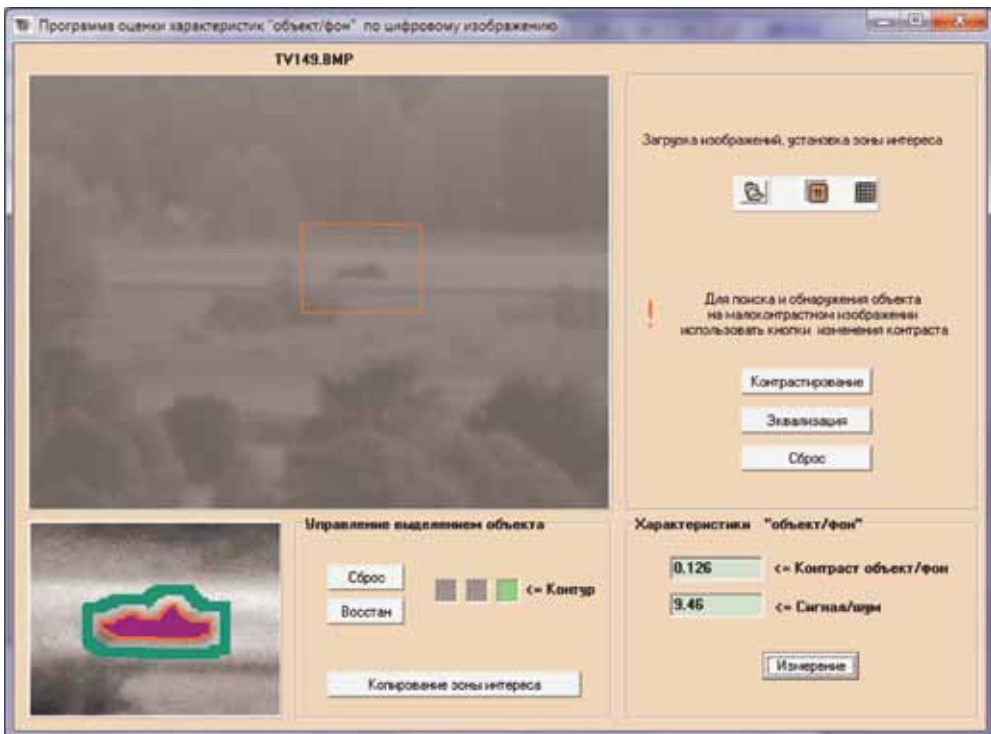


Рис. 4. Окно программного пакета оценки локальных параметров на изображении



яркостей объекта (яркость, усредненная по площади объекта) и прилегающего фона (яркость, усредненная по площади фона) к среднеквадратическому отклонению шума в окрестности объекта.

При определении локальных параметров объекта на изображении принято следующее:

- площадь прилегающего фона равная не менее удвоенной площади объекта;
- контур анализируемого фона повторяет контур объекта, ширина полосы фона примерно равна половине сечения объекта в данном направлении;

- $\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^N (L_x - L_{x+1})^2}{2(N-1)}}$ , где  $N$  — число пар определенных точек изображения  $(L_x, L_{x+1})$ , которые отбираются по определенному алгоритму, выделяющему относительно ровные участки и исключаяющему контурные точки, содержащие высокочастотную компоненту на основе подхода [Чочиа, 1988]. Выделение объекта на фоне производится вручную. Оператор по визуально воспринимаемому изображению объекта в интерактивном режиме обводит контур объекта шириной в один пиксел. Результаты определения локальных параметров и внешний вид диалогового окна программы приведены на рис. 4.

## ВЫВОДЫ

Предложенный интегральный показатель качества и алгоритмы вычисления локальных параметров реализованы в программном пакете оценки качества цифровых изображений, используемым для отработки, проведения испытаний и оценки эффективности работы функциональных операторов ЦОИ, нашедших применение в семействе многофункциональных систем цифровой обработки видеоизображений «Охотник» [Алпатов и др., 2011]. ИПК использован для оценки информативности каналов технического зрения многоспектральных систем улучшенного видения с целью адаптивной настройки операторной цепи и параметров алгоритмов комплексирования видеоизображений. В дальнейших исследованиях следует уделить внимание вопросам оценки высокочастотной составляющей изображения, корректного отделения ее от шумовой составляющей и определения влияния этого параметра на интегральный показатель объективного качества изображения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Алпатов и др., 2010] Алпатов Б. А., Блохин А. Н., Костяшкин Л. Н., Романов Ю. Н., Шанка С. В. Семейство многофункциональных систем обработки видеоизображений «Охотник» // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 4. С. 44–51.
- [Богданов и др., 1998] Богданов А. П., Костяшкин Л. Н., Матвеева Е. И., Романов Ю. Н. Преобразование гистограмм телевизионных изображений без ухудшения визуального качества // Современное телевидение: Тез. докл. 6-й научно-технич. конф. 1998. С. 39.
- [Кривошеев, 1989] Кривошеев М. Основы телевизионных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 608 с.
- [Кривошеев, Федунин, 2007] Кривошеев М., Федунин В. Международные стандарты по цифровому телевизионному вещанию / Связь и телекоммуникации. 2007. № 7.

- [Травникова, 1985] *Травникова Н. П.* Эффективность визуального поиска. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
- [Филатов и др., 2007] *Филатов Г., Якубсон С., Беглова Н.* Развитие подвижных наземных комплексов ОЭС сухопутных войск за рубежом // Зарубежное военное обозрение. 2007. № 1–2.
- [Фишберн, 1978] *Фишберн П. С.* Теория полезности для принятия решений / Под ред. Н. Н. Воробьева. М.: Наука, 1978. 352 с.
- [Чочиа, 1988] *Чочиа П. А.* Двухмасштабная модель изображения // Кодирование и обработка изображений. М.: Наука, 1988. С. 69–87.
- [Moorthy et al., 2010] *Moorthy A. K., Wang Z., Bovik A. C.* Visual perception and quality assessment // Optical and Digital Image Processing / Eds. G. Cristobal, P. Schelkens, H. Thienpont. WileyWiley VCH, 2011. P. 419–439. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://live.ece.utexas.edu/people/bovik/publications/index.php>.
- [Moorthy, Bovik, 2009] *Moorthy A. K., Bovik A. C.* Visual importance pooling quality assessment // IEEE J. Selected Topics in Signal processing. Issue in Visual Media Quality Assessments. 2009. V. 3. P. 193–201. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://live.ece.utexas.edu/people/bovik/publications/index.php>.
- [Wang, Bovik, 2002] *Wang Z., Bovik A. C.* A universal image quality index // IEEE Signal Processing Letters. 2002. V. 9. N. 3. P. 81–84. [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://ece.uwaterloo.ca/~z70wang/publications.htm>.

## DIGITAL IMAGES QUALITY ASSESSMENT

A. P. Bogdanov, Y. N. Romanov

*JSCo “Ryazan State instrument-making enterprise” (JSCo “RSIE”), Ryazan*

This paper deals with the problem of digital image quality objective assessment. This quality evaluation method is introduced, based on the selection and combination of subjective partial criteria and numerical characteristics, obtained as a result of statistical image analysis. The results of software package performance for digital images quality assessment are demonstrated to show the efficiency of this approach.

*Keywords:* digital image processing, visual quality, objective metrics, integral index, local contrast value and signal-to-noise ratio.

---

**Bogdanov Arkady Petrovich** — senior researcher, e-mail: [hunter-rzn@yandex.ru](mailto:hunter-rzn@yandex.ru).

**Romanov Yury Nikolaevich** — deputy director research and design center — chief of line, e-mail: [hunter-rzn@yandex.ru](mailto:hunter-rzn@yandex.ru).

## СИНТЕЗ ДВУХДИАПАЗОННЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЭКВАЛИЗАЦИЕЙ ДВУМЕРНОЙ ГИСТОГРАММЫ

К. В. Козлов<sup>1,2</sup>, С. М. Соколов<sup>3</sup>, В. Н. Соляков<sup>1,2</sup>,  
Д. Ю. Тренин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-производственное объединение «Орион», Москва

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет) (МФТИ), Долгопродный

<sup>3</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша  
Российской академии наук (ИПМ РАН), Москва

Описывается метод синтеза двухдиапазонных инфракрасных изображений, полученных с помощью матричных фотоприемных устройств (МФПУ), чувствительных в среднем (MWIR) и дальнем (LWIR) диапазонах спектра. Метод основывается на построении двумерной палитры, учитывающей неравномерность гистограммы изображений, и схож с методом эквализации гистограмм обычных (однодиапазонных) изображений, однако учитывает высокую степень коррелированности инфракрасных изображений.

*Ключевые слова:* двухдиапазонные изображения, синтез, эквализация гистограмм.

### ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасные или тепловые изображения находят свое применение в различных отраслях промышленности, строительстве, научных исследованиях, медицине, военном деле. Один из путей развития тепловизионной техники, как и телевидения, — переход от черно-белого изображения к цветному. Но в отличие от телевидения, где происходит регистрация излучения в видимом диапазоне, и получаемая информация интерпретируется как реальный цвет объекта, в тепловидении можно говорить о «цвете» как о коде зарегистрированных сигналов в нескольких спектральных диапазонах.

Инфракрасные изображения (как однодиапазонные — черно-белые, так и многодиапазонные — «цветные») требуют определенных алгоритмов обработки для улучшения их восприятия человеком. Большинство традиционных методов применимы и при обработке тепловизионных изображений. Среди высокоэффективных и автоматических, т. е. не требующих настройки оператором, следует выделить основанные на статистических характеристиках изображений алгоритмы эквализации гистограмм [Гонсалес, Вудс, 2005].

В статье описывается метод эквализации гистограммы двухдиапазонного тепловизионного изображения MWIR- и LWIR-диапазонов.

---

**Козлов Кирилл Владимирович** — техник, e-mail: orion@ir-orion.ru.

**Соколов Сергей Михайлович** — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: sokolsm@list.ru.

**Соляков Владимир Николаевич** — главный научный сотрудник, доктор технических наук, доцент, e-mail: orion@ir-orion.ru.

**Тренин Дмитрий Юрьевич** — начальник НТЦ, e-mail: orion@ir-orion.ru.

## ЭКВАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНОЙ ГИСТОГРАММЫ

Для обработки двух изображений, полученных в разных ИК-диапазонах, часто используются палитры [Goldberg et al., 2000; Schreer et al., 2007]. Обычно цветные палитры используются для «раскрашивания» инфракрасных изображений в псевдоцветах. Если по двум осям ( $Ox$  и  $Oy$ ) на плоскости отложить значения яркостей точек изображений и каждой паре значений  $(x, y)$  поставить в соответствие определенное значение цвета  $c$ , то графическая зависимость  $c(x, y)$  будет представлять собой двумерную палитру. В процессе синтеза двухдиапазонного изображения каждой точке синтетического изображения присваивается цвет из палитры в соответствии с яркостями соответствующих точек на исходных изображениях. Такой подход позволяет получать изображения, на которых различные объекты «раскрашены» в разные цвета, что улучшает визуальное восприятие изображения человеком. Из-за физических особенностей инфракрасных изображений, а именно низкой контрастности объектов и фона, а также высокой степени корреляции сигналов, сильно нагретые тела обычно выглядят самими яркими. Распределение сигналов получается неравномерным, и на итоговом изображении используются не все цвета и оттенки из палитры, а только малая их часть.

Для иллюстрации указанных эффектов рассмотрим инфракрасные изображения пригородного электропоезда, полученные с помощью двухдиапазонного тепловизионного прибора, созданного на основе МФПУ формата  $320 \times 256$  элементов, чувствительных в средневолновом и длинноволновом диапазонах спектра [Горелик и др., 2011] (рис. 1).



Рис. 1. Фотография электропоезда на станции (слева) и его тепловизионные изображения в MWIR (в центре) и LWIR (справа) диапазонах

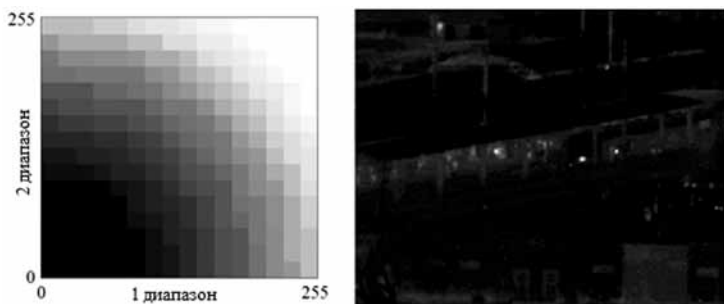


Рис. 2. Двумерная палитра (слева) и результат синтеза с использованием этой палитры (справа)

Прибор построен по схеме с общим входным отверстием и спектральным разделением потока в параллельном пучке лучей. Это позволяет получать изображения, объекты на которых совпадают с точностью  $1/4$  элемента. Размер одного элемента в пространстве предметов равен  $0,3 \times 0,3$  м.

Хотя над изображениями была проведена операция контрастирования, чтобы все сигналы обоих изображений лежали в диапазоне  $0 \dots 255$  включительно, они все равно остаются слабоконтрастными.

Для синтеза итогового изображения могут использоваться различные палитры, например, представленная на рис. 2. На этом же рисунке представлен результат синтеза. Изображение слабоконтрастное, хотя и содержит все особенности обоих исходных изображений.

Для оценки количества и разнообразия оттенков изображения, а также общего уровня его яркости часто используется гистограмма. В случае двух изображений гистограмма становится двумерной — значения яркостей исходных изображений откладываются по двум горизонтальным осям, а количество пикселей с данным соотношением яркостей — по вертикальной оси. Распределение яркостей для изображений электропоезда представлено на рис. 3. По обеим осям существуют точки, принимающие значения яркостей во всем диапазоне. Однако основная масса точек изображения лежит в сравнительно небольшой области вблизи низких значений яркостей.

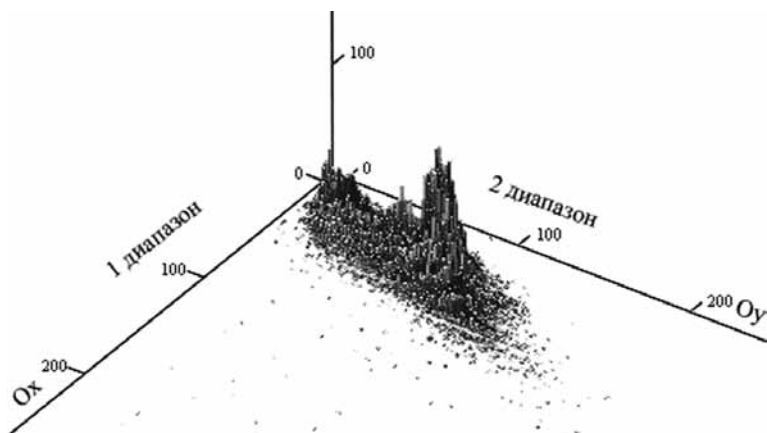


Рис. 3. Гистограмма изображения электрички

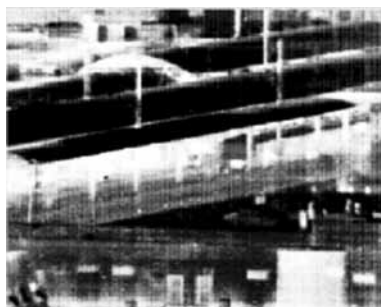


Рис. 4. Результат синтеза эквализованных инфракрасных изображений

Это приводит к продемонстрированным на рис. 2 затруднениям при синтезе изображений. Одно из возможных решений проблемы — эквализация получаемой двумерной гистограммы, т. е. приведение распределения к равномерному. В результате восстановленное изображение выглядит *более контрастным* и лучше *различаются детали* исходных изображений.

Хорошо известен и отработан алгоритм нормализации гистограммы одного изображения. Суть его в разбиении шкалы яркостей на участки с приблизительно равными суммами значений гистограммы. После этого каждому из участков присваивается соответствующее значение яркости. В итоге для каждого пиксела исходного изображения ищется участок, в который попадает значение яркости этого пиксела и происходит восстановление изображения. Если применить этот метод к двум исходным инфракрасным изображениям по отдельности, а затем провести синтез изображения с помощью палитры, то можно увидеть результат (рис. 4). Видно, что он неудовлетворительный. Изображение хотя и более контрастное, и стало возможным различать некоторые его детали (например, людей в правой нижней части изображения), но увеличение шума и появление артефактов не позволяет говорить о приемлемости результата. Независимая нормализация привела к *потере значительной части деталей и появлению ложных*.

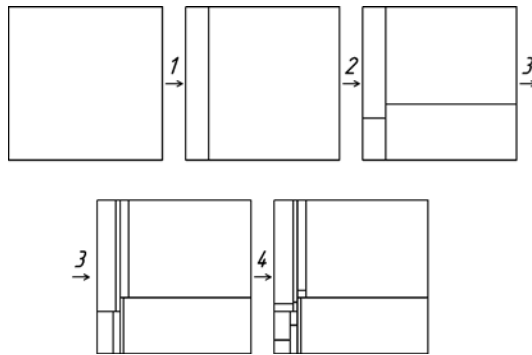


Рис. 5. Схема построения палитры

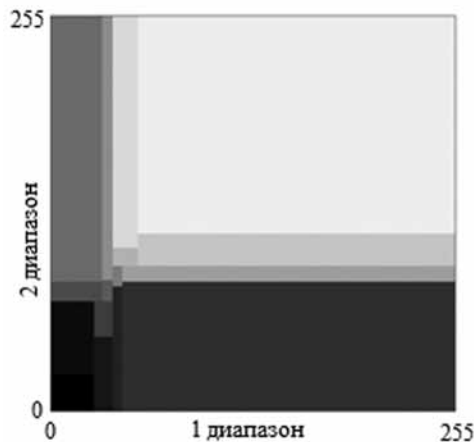


Рис. 6. Палитра при мелкости разбиения  $k = 16$



Рис. 7. Результат синтеза с эквализацией двумерной гистограммы (слева) и независимой эквализацией (справа)

Таким образом, алгоритм независимой эквализации не решает поставленных задач улучшения изображения. Рассмотрим алгоритм, преобразующий непосредственно двумерную гистограмму. Назовем мелкостью разбиения  $k$  количество прямоугольных областей, на которое мы делим плоскость гистограммы. Разобьем двумерную гистограмму на прямоугольники таким образом, чтобы количество пикселей внутри каждого из них было приблизительно равным. Для этого область двумерной гистограммы делится на две подобласти с примерно равными суммами элементов (шаг 1). Операция повторяется несколько раз с получением на каждом шаге более мелкими подобластями. В результате достигается мелкость разбиения  $k = 2^n$ , где  $n$  — натуральное число. Схематически процедура разбиения представлена на рис. 5. Если исходные изображения имеют формат  $M \times N$  элементов, а мелкость разбиения равна  $k$ , то в результате мы получаем  $k$  областей с суммами элементов, равными примерно  $M \times N/k$  каждая. Затем каждой из областей присваивается определенное значение яркости или цвета (рис. 6). Применение цветов в этом случае предпочтительнее, так как использование только градаций серого позволяет закодировать всего 256 областей палитры (мелкость разбиения будет равна 256).

Результат синтеза изображения по такой палитре представлен на рис. 7 слева. Справа на этом рисунке приведен еще раз для сравнения результат синтеза изображения с независимой эквализацией гистограмм.

Для сравнения изображений по критерию удобства восприятия оператором можно воспользоваться понятием контраста. Выберем для анализа силуэт человека на изображении городской электрички. На рис. 8 приведен фрагмент исходного изображения, в центре которого находится рассматриваемый объект. В качестве фона берем область, находящуюся на рис. 8 внутри рамки и не принадлежащую самому объекту. Еще одной характеристикой изображения будет отношение сигнал/шум, например, для области платформы станции. В таблице представлены результаты расчета этих параметров для исходных и синтетических изображений.

#### Характеристики изображений

	MWIR	LWIR	Независимая эквализация	Двумерная эквализация
Контраст	0,11	0,10	0,03	0,13
Сигнал/шум	10,56	11,96	6,78	10,91



**Рис. 8.** Тепловизионное изображение человека

Расчет показал, что на синтезированном с помощью независимой эквализации изображении контраст объекта наименьший, а на изображении, синтезированном по алгоритму эквализации двумерной гистограммы наибольший. Больше у него и отношение сигнал/шум.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен один из способов обработки двухдиапазонных инфракрасных изображений — эквализация двумерной гистограммы. Показаны недостатки алгоритма независимой эквализации применительно к данной проблеме. Продемонстрированы преимущества алгоритма эквализации двумерной гистограммы путем разбиения ее на прямоугольные области. Полученные изображения лучше воспринимаются оператором и содержат данные об объектах в обоих диапазонах. В развитии предложенного подхода предполагается определение оптимальной мелкости разбиения гистограммы и использование для формирования синтетического изображения цветных палитр.

Работа проводилась при поддержке РФФИ (проекты № 11-08-01045, 10-07-00253-а 10-07-00303-а).

### ЛИТЕРАТУРА

- [Гонсалес, Вудс, 2005] *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- [Горелик и др., 2011] *Горелик Л. И., Дрогайцева Е. В., Полесский А. В., Сидорин А. В., Соляков В. Н., Тренин Д. Ю.* Двухдиапазонная тепловизионная система для спектральных диапазонов 3...5 и 8...12 мкм // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 92–96.
- [Goldberg et al., 2000] *Goldberg A., Fischer T., Kennerly S., Wang S., Sundaram M., Uppal P., Winn M., Milne G. M.* Dual-Band Imaging of Military Targets Using a QWIP Focal Plane Array // Stevens Meeting of the MSS Specialty Group on Passive Sensors. 2000. V. 1. P. 20–2000.
- [Schreer et al., 2007] *Schreer O., Saenz M. L., Peppermuller C., Schmidt U.* Dual-band camera system with advanced image processing capability // Proc. of Soc. Photographic Instrumentation Engineers (SPIE). 2007. P. 6542–2007.



**DUAL-BAND INFRARED IMAGE SYNTHESIS  
USING 2D-HISTOGRAM EQUALIZATION**

**K. V. Kozlov<sup>1,2</sup>, S. M. Sokolov<sup>3</sup>, V. N. Solyakov<sup>1,2</sup>, D. Y. Trenin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Orion Research-And-Production Association,  
Federal State Unitary Enterprise, Moscow*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudniy*

<sup>3</sup> *Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow*

Dual-band infrared image synthesis method is described. Images are obtained in the dual-band infrared system, based on two FPA's, sensitive in MWIR and LWIR ranges. Synthesis method is based on 2D-bar graph analysis. Method is related to the equalization of standard bar graph, but takes into consideration the correlation between images.

*Keywords:* dual-band images, synthesis, equalization.

---

**Kozlov Kirill Vladimirovich** — technician, e-mail: orion@ir-orion.ru.

**Sokolov Sergey Mihailovich** — chief researcher, Doctor of Science, professor, e-mail: sokolsm@list.ru.

**Solyakov Vladimir Nikolaevich** — chief researcher, Doctor of Technics, associate professor, e-mail: orion@ir-orion.ru.

**Trenin Dmitry Yurievich**, head of a department, e-mail: orion@ir-orion.ru.

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ

Ю. В. Визильтер<sup>1</sup>, С. В. Сидякин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»  
(ФГУП ГосНИИАС), Москва

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский  
университет) (МАИ), Москва

Работа посвящена алгоритмам построения дискретных и непрерывных *критериальных морфологических спектров* по параметру морфологической сложности. Рассмотрен новый подход к вычислению морфологических спектров плоских фигур и полутоновых изображений с *дисковыми* структурирующими элементами, основанный на использовании *непрерывных скелетных представлений* плоских фигур.

*Ключевые слова:* математическая морфология, морфологические спектры, анализ изображений.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [Maragos, 1989] по аналогии со спектрами Фурье был предложен способ описания плоских фигур и изображений при помощи форморазмерных спектров, вычисляемых средствами математической морфологии Серра [Serra, 1982]. Известно, что морфологические спектры — полезные и устойчивые дескрипторы формы изображений.

В данной работе рассмотрен новый подход к вычислению морфологических спектров плоских фигур и полутоновых изображений с *дисковыми* структурирующими элементами, основанный на использовании *непрерывных скелетных представлений* плоских фигур [Местецкий, 2009], уровневого разложения полутоновых морфологических операций. Этот подход позволяет формировать дискретно-непрерывные морфологические спектры плоских фигур в реальном времени, что делает их пригодными для использования в прикладных задачах машинного зрения.

Методика построения морфологических спектров, предложенная Марагосом, может быть обобщена на случай любых проективных морфологических систем для вычисления дискретных и непрерывных *критериальных морфологических спектров* по параметру морфологической сложности. Основная идея их вычисления заключается в построении непрерывной зависимости для критерия морфологического риска по параметру морфологической сложности  $\alpha$ . После чего полученный результат позволяет формировать точное, а не приближенное, представление морфологических спектров, что повышает их информативность и точность сравнения таких спектров между собой.

---

Визильтер Юрий Валентинович — начальник подразделения, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: viz@gosniias.ru.

Сидякин Сергей Владимирович — инженер, e-mail: sersid@bk.ru.

## ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПЛОСКИХ ФИГУР НА ОСНОВЕ СКЕЛЕТНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Предложенный ранее [Визильтер и др., 2011] алгоритм основан на голосовании точек скелета в двумерный *аккумулятор*, размер которого совпадает с размером исследуемого бинарного изображения.

### Алгоритм 1

*Шаг 1.* Представить бинарное изображение в виде непрерывной многоугольной фигуры  $F$ .

*Шаг 2.* Вычислить скелетное представление фигуры  $F$  [Местецкий, 2009].

*Шаг 3.* Инициализировать все ячейки аккумулятора нулями.

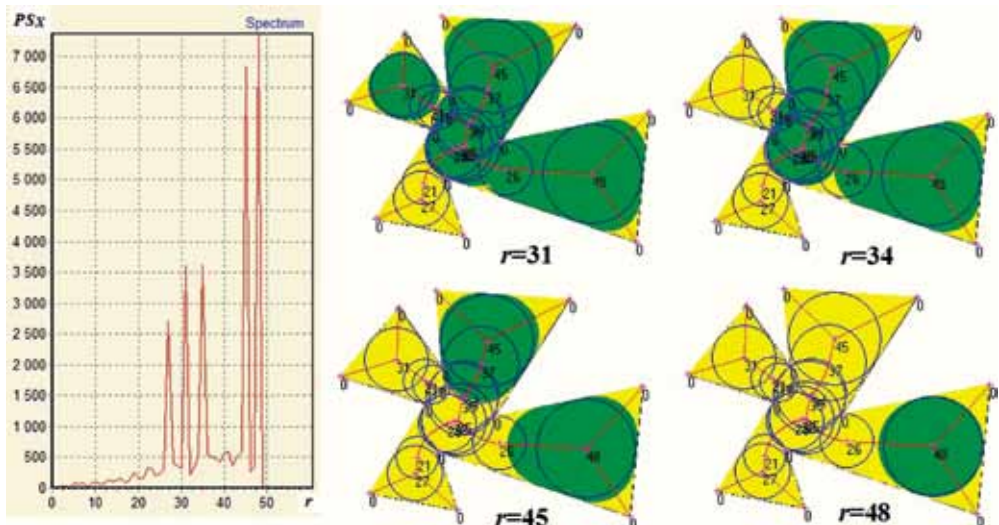
*Шаг 4.* Выбрать очередное ребро из списка ребер скелета и перейти к шагу 5. Если список пуст, перейти к шагу 6.

*Шаг 5.* Текущее ребро скелета представить в дискретном виде при помощи алгоритма Брезенхэма, образовав набор точек  $\{p_i\}$ , характеризуемых координатами  $(x_i, y_i)$  центра и радиусом  $r_i$  соответствующих пустых кругов. Для каждой точки  $p_i$  при помощи алгоритма Брезенхэма построить окружность радиуса  $r_i$  в аккумуляторе, поместив в соответствующие ячейки значение радиуса  $r_i$ , если  $r_i$  больше текущего значения в рассматриваемой ячейке, в противном случае — оставить ее без изменений. Вернуться к шагу 4.

*Шаг 6.* Вычислить морфологический спектр как гистограмму значений аккумулятора. *Конец алгоритма.*

На рис. 1 представлен вычисленный описанным способом *дискретно-непрерывный морфологический спектр* (ДНМС) многоугольной фигуры.

Предлагается обобщить данный алгоритм на случай полутоновых изображений за счет использования стекового разложения морфологических операторов.



**Рис. 1.** Дискретно-непрерывный морфологический спектр и пиковые составляющие формы фигуры

**СТЕКОВОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАТОРОВ И СТЕКОВЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С «ПЛОСКИМ» СТРУКТУРИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Пусть дана дискретная  $N$ -уровневая двумерная функция

$$f(x, y) \in \{0, 1, \dots, N-1\} \subseteq Z, \quad (x, y) \in R^2.$$

Определим срез функции на уровне  $l \in \{0, \dots, N\} \subseteq Z$  как бинарную функцию  $f_l(x, y)$ :

$$f_l(x, y) = \{1: f(x, y) \geq l; 0: f(x, y) < l\}.$$

Полным срезовым стеком функции  $f(x, y)$  назовем упорядоченный набор ее срезов  $f$ , на основе которых можно определить оператор реконструкции срезового стека  $\delta$ :

$$f = \langle f_0(x, y), \dots, f_N(x, y) \rangle,$$

$$f(x, y) = \delta f = \sum_{l=0}^N \{f_l(x, y)\} = \max_{l=0, \dots, N} \{lf_l(x, y)\}.$$

При этом между любыми срезами  $f_l(x, y)$  и  $f_c(x, y)$  выполняется так называемое стекое свойство элементов срезовой цепи:

$$c > l \Rightarrow f_l(x, y) \geq f_c(x, y).$$

Рассмотрим частный случай полутоновой морфологии Серра с так называемыми «плоскими» (flat) бинарными структурирующими элементами  $b(u, v) \in [0, 1]$

Фильтры полутоновой морфологии Серра [Serre, 1982] принимают вид:

$$f(x, y) \odot b(u, v) = \sum_{l=0}^N \{f_l(x, y) \odot b(u, v) = \max_{l=0, \dots, N} \{lf_l(x, y) \odot b(u, v)\}\},$$

$$f(x, y) \circ b(u, v) = \sum_{l=0}^N \{f_l(x, y) \circ b(u, v)\} = \max_{l=0, \dots, N} \{lf_l(x, y) \circ b(u, v)\}.$$

Отсюда вклад «объекта» в полутоновой спектр на  $l$ -м уровне:

$$PS_{fl}(r, b) = -\frac{\partial S(f_lrb)}{\partial r}, \quad r \geq 0. \quad (1)$$

Следовательно, полный полутоновой спектр объекта может быть также вычислен как сумма бинарных срезовых спектров:

$$PS_f = \sum_{l=0}^N \{c_l PS_{fl}(r, b)\}, \quad c_l = \frac{\text{hist}[l] - \text{hist}[l-1]}{255}, \quad l \in N, \quad (2)$$

где  $c_l$  — коэффициент «значимости» уровня; hist — гистограмма анализируемого изображения.

**Алгоритм 2**

*Шаг 0.* Выбрать первый уровень из списка уровней.

*Шаг 1.* Представить бинарное изображение текущего уровня в виде непрерывной многоугольной фигуры  $G$ .

*Шаг 2.* Вычислить срезовой спектр  $PS_G(r, b)$  при помощи алгоритма 1.

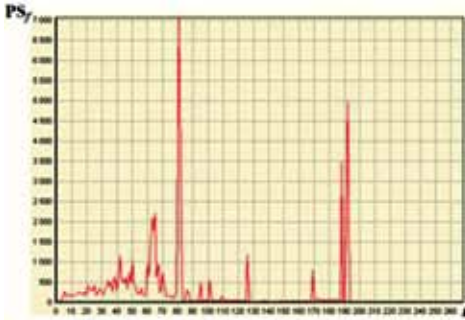
*Шаг 3.* Выбрать изображение, соответствующее следующему уровню, и перейти к шагу 1. Если все уровни пройдены, то перейти к шагу 4.



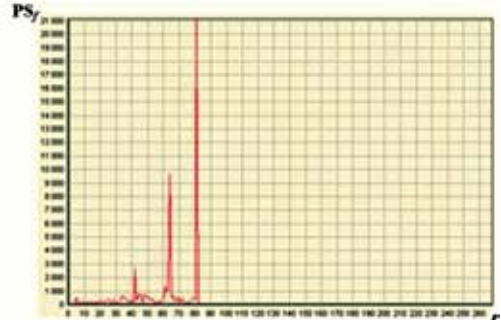
Исходное полутоновое изображение



Бинаризованный эталон



МС полутонового изображения



МС бинаризованного эталона

**Рис. 2.** Морфологические спектры (МС) полутонового изображения кленового листа и бинаризованного изображения кленового листа

*Шаг 4.* Все вычисленные срезовые спектры суммировать в общий полутоновой спектр с учетом коэффициентов «значимости» уровней в соответствии с формулами (2). *Конец алгоритма.*

На рис. 2 представлены морфологические спектры для полутонового изображения кленового листа и бинаризованного изображения кленового листа.

#### ПОСТРОЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ДИСКРЕТНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПО ПАРАМЕТРУ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ $\alpha$

Пусть имеется некоторый переменный структурирующий параметр  $r$ , однозначно и монотонно связанный с параметром морфологической сложности  $\alpha$ . Двухэтапная схема вычисления критериального морфологического спектра  $PS(A, \alpha)$  [Визильтер, 2008] состоит в первоначальном построении распределения значений критерия по базовому переменному параметру  $r$  и последующем пересчете этого распределения к соответствующим значениям параметра морфологической сложности с учетом зависимости  $r(\alpha)$ . Основанием для этого будет формула дифференцирования сложной функции:

$$PS(A, \alpha) = \frac{\partial J(A, \psi_{r(\alpha)} A)}{\partial \alpha} = J'_r(A, \psi_{r(\alpha)} A) r'_\alpha(\alpha),$$

$$\text{где } J'_r(A, \alpha_{r(\alpha)} A) = \frac{\partial J(A, \alpha_{r(\alpha)} A)}{\partial r}, \quad r'_\alpha(\alpha) = \frac{\partial r(\alpha)}{\partial \alpha}.$$

Рассмотрим данную схему на примере построения морфологического спектра бинарной фигуры  $A$  по оператору открытия структурирующим элементом  $rD$  с переменным параметром  $r$ . Морфологический критерий имеет вид нормализованного критерия:

$$F_\alpha(A, r) = (\alpha - 1)S(A \circ rD) + \alpha S(A \ominus rD), \quad (3)$$

$$PS(A, \alpha) = J'_r(A, \psi_{r(\alpha)} A) r'_\alpha(\alpha) = \frac{-\partial S(A \circ rD)}{\partial r} r'_\alpha(\alpha) = PS_A(r, D) r'_\alpha(\alpha),$$

где  $PS_A(r, D)$  — морфологический спектр образа  $A$  по  $r$ .

#### Алгоритм дискретного приближения морфологического спектра сложности

1. Задать шаг (дискрет)  $\Delta r$  и диапазон  $[r_{\min}, r_{\max}]$  вычислений по  $r$ .
2. Задать шаг (дискрет)  $\Delta \alpha$  вычислений по  $\alpha$ .
3. С выбранным шагом  $\Delta r$  для всех точек диапазона  $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$ :
  - 3.1. Вычислить площади открытия  $S(r) = S(A \circ rD)$ , эрозии  $S(A \ominus rD)$ .
  - 3.2. С выбранным шагом  $\Delta \alpha$  для всех точек диапазона  $\alpha \in [0, 1]$  вычислить по формуле (3) значения функции-критерия  $F_\alpha(A, r)$ .
4. С выбранным шагом  $\Delta \alpha$  для всех точек диапазона  $\alpha \in [0, 1]$  вычислить значения  $r(A, \alpha) = \arg \min_{r \in [r_{\min}, r_{\max}]} F_\alpha(A, r)$ .
5. С выбранным шагом  $\Delta r$  для всех точек диапазона  $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$  вычислить дискретный морфологический спектр по параметру  $r$ :

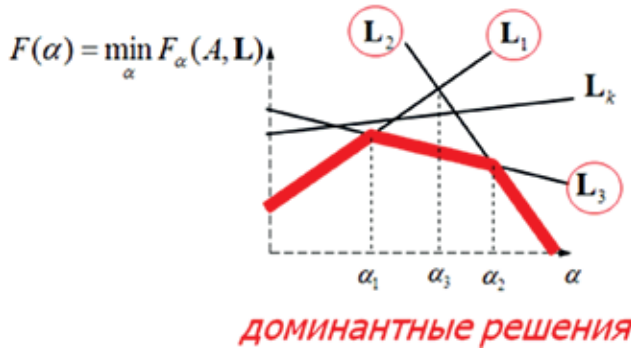
$$PS(r) = S(r) - S(r + \Delta r).$$

6. С выбранным шагом  $\Delta \alpha$  для всех точек диапазона  $\alpha \in [0, 1]$  вычислить дискретную производную  $r'_\alpha(\alpha) = r(\alpha + \Delta \alpha) - r(\alpha - \Delta \alpha)$ , после чего, подставляя зависимость  $r(\alpha)$  в  $PS(r)$ , рассчитать значения морфологического спектра по параметру сложности:  $PS(A, \alpha) = PS(r(\alpha)) r'_\alpha(\alpha)$ . *Конец алгоритма.*

#### ПОСТРОЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПО ПАРАМЕТРУ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ $\alpha$

При построении непрерывных спектров по базовому переменному параметру сложности за основу была взята идея подхода к параметрической оптимизации критериев, заданных рациональными функциями, описанного в статье [Kolmogorov et al., 2007]. Рассмотрим критерий морфологического риска  $F_\alpha(A, L) = (1 - \alpha)J(A, L) + \alpha Q(L)$ , где  $F_\alpha(A, L)$  — кусочно-линейная функция, с конечным числом линейных участков;  $A$  — исходная функция;  $L$  — функция-решение, принадлежащая некоторому классу функций  $V$ :  $A, L \in V$ . Построим функцию, представляющую собой минимум критерия морфологического риска от параметра морфологической сложности:

$$F(\alpha) = \min_{\alpha} F_\alpha(A, L). \quad (4)$$



**Рис. 3.** Красной линией показана нижняя огибающая  $F(\alpha) = \min_{\alpha} F_{\alpha}(A, L)$ ;  $L_1, L_2, L_3$  — доминантные решения; переключения между решениями происходят в точках  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  (иллюстрация метода заимствована из работы [Kolmogorov et al., 2007] с разрешения авторов)

Решения  $L_1, \dots, L_k \in L$ , оптимальные, по крайней мере, для одного значения параметра  $\alpha$ , называются доминантными решениями.

Для того чтобы решить поставленную задачу на интервале  $I = [\alpha^{\min}, \alpha^{\max}]$ , необходимо вычислить решения  $L_1, \dots, L_k$  и интервалы  $I_1 = [\alpha^{\min}, \alpha_1]$ ,  $I_2 = [\alpha_1, \alpha_2], \dots, I_k = [\alpha_{k-1}, \alpha^{\max}]$ . Такая задача может быть решена с использованием подхода, описанного в [Kolmogorov et al., 2007]. На рис. 3 показана геометрическая интерпретация рассматриваемого алгоритма построения «нижней огибающей».

В итоге создается и обрабатывается список «решение — интервал»  $(L_i, I_i), \dots, (L_k, I_k)$ , в котором каждое решение  $L_i$  оптимально на интервале  $\alpha \in I_i$  и при этом справедливо условие  $\sup I_i \leq \inf I_j$  для соседних интервалов  $I_i, I_j$  ( $j = i + 1$ ). Алгоритм построения «нижней огибающей» для функционала вида (4) с вычислением всех узловых точек нижней огибающей  $\alpha_i \in [\alpha^{\min}, \alpha^{\max}]$  имеет следующий вид:

*Шаг 1.* Вычислить значения  $L^{\min}, L^{\max}$  для  $\alpha^{\min}, \alpha^{\max}$ :

**если**  $L^{\min} = L^{\max}$ , **то** инициализировать список  $(L^{\min}, [\alpha^{\min}, \alpha^{\max}])$ ,

**иначе** инициализировать список  $(L^{\min}, \{\alpha^{\min}\}), (L^{\max}, \{\alpha^{\max}\})$ .

*Шаг 2.* Пока между соседними элементами рассматриваемого списка существует пустой интервал, т. е.  $(\alpha_i, \alpha_j) = (\sup I_i, \inf I_j) \neq \emptyset$ :

решить линейное уравнение  $F_{\alpha}(A, L_i) = F_{\alpha}(A, L_j)$ , найти  $\alpha$ :

**если**  $\alpha_j$  является решением, **то** установить границы  $j$ -го интервала  $I_j = I_j \cup [\alpha_i, \alpha_j]$ ;

**если**  $\alpha_i$  является решением, **то** установить границы  $i$ -го интервала  $I_i = I_i \cup [\alpha_i, \alpha_j]$ ;

**иначе**  $\alpha$  — единственное решение на интервале  $\alpha \in (\alpha_i, \alpha_j)$

вычислить  $L$  для  $F_{\alpha}(A, L)$ :

**если**  $L = L_i$  или  $L = L_j$ , **то** установить значения интервалов  $I_i, I_j$ :  $I_i = I_i \cup [\alpha_i, \alpha]$ ,  $I_j = I_j \cup [\alpha, \alpha_j]$ ,

**иначе** добавить  $(L, \{\alpha\})$  между  $(L_i, I_i)$  и  $(L_j, I_j)$ .

После вычисления  $L$  для  $\alpha \in (\alpha_i, \alpha_j)$  выбираем следующий интервал. Для этого последовательно просматриваются все интервалы на отрезке  $[\alpha^{\min}, \alpha^{\max}]$  и выбирается тот, для которого  $(\sup I_i, \inf I_j) \neq \emptyset$ .

*Шаг 3.* Если ни один интервал на отрезке  $[\alpha^{\min}, \alpha^{\max}]$  не удовлетворяет условию  $(\sup I_i, \inf I_j) \neq \emptyset$ , то завершить работу. *Конец алгоритма.*

В итоге, используя зависимости минимума критерия морфологического риска от параметра морфологической сложности  $\alpha$ , получаем зависимость функционала соответствия  $J$  от  $\alpha$  и строим итоговый непрерывный критериальный морфологический спектр по формуле

$$PS(\alpha) = \frac{\partial J}{\partial \alpha}.$$

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-08-01114-а, 11-08-01039-а).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен вычислительно-эффективный подход к построению морфологических спектров плоских фигур и полутоновых изображений. Разработаны две практические схемы построения дискретных и непрерывных критериальных морфологических спектров по параметру морфологической сложности, основанных на критериальных проективных морфологиях.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Визильтер, 2008] *Визильтер Ю. В.* Обобщенная проективная морфология // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 4. С. 384–399.
- [Визильтер и др., 2011] *Визильтер Ю. В., Сидякин С. В., Рубис А. Ю.* Вычисление морфологических спектров плоских фигур с использованием непрерывных скелетных представлений // Математические методы распознавания образов: 15-я Всерос. конф. Петрозаводск, 11–17 сент. 2011: Сб. докл. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 416–420.
- [Местецкий, 2009] *Местецкий Л. М.* Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры. Скелеты. Циркуляры. М.: Физматлит, 2009.
- [Kolmogorov et al., 2007] *Kolmogorov V., Boykov Y., Rother C.* Applications of parametric maxflow in computer vision // IEEE Intern. Conf. Computer Vision (ICCV). Oct. 2007.
- [Maragos, 1989] *Maragos P.* Pattern Spectrum, Multiscale Shape Representation // IEEE Trans. on pattern analysis, machine intelligence. 1989. V. 2. N. 7. P. 701–716.
- [Serra, 1982] *Serra J.* Image Analysis and Mathematical Morphology. L.: Academic Press, 1982.

### MORPHOLOGICAL SPECTRUMS

Y. V. Vizilter<sup>1</sup>, S. V. Sidyakin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State research institute of aviation systems (FGUP “GosNIIAS»), Moscow

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

This work is about the algorithms of constructing discrete and continuous spectrums based on the morphological parameter’s criteria of the morphological com-



plexity. The new approach to the computation of morphological spectrums of flat figures and grayscale images with disc structuring elements, based on the using of continuous skeleton representations, was proposed.

*Keywords:* mathematical morphology, morphological spectrums, image analysis.

---

**Vizilter Yuri V.** — head of the department, dr. sci. (phys.-math.), senior researcher, e-mail: viz@gosniias.ru.

**Sidyakin Sergey V.** — engineer, e-mail: sersid@bk.ru.

# ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ С МНОГОУРОВНЕВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ДЛЯ БЫСТРОЙ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М. М. Ланге<sup>1</sup>, Н. А. Новиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН (ВЦ РАН), Москва*

<sup>2</sup> *Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА), Москва*

Предложен метод координатной привязки фрагментов изображения, основанный на их сравнении с множеством эталонных фрагментов. Дано описание представлений фрагментов в виде древовидно структурированных наборов эллиптических примитивов, и введена мера различия на множестве представлений. Рассмотрен алгоритм быстрого поиска ближайшего эталона на основе сравнения представлений фрагментов с многоуровневым разрешением. Проведены эксперименты с зашумленными фрагментами спутникового снимка земной поверхности. Показано, что приемлемая точность координатной привязки может быть достигнута при достаточной глубине древовидных представлений. В случае использования алгоритма быстрого поиска продемонстрирован рост производительности без существенного падения точности привязки.

*Ключевые слова:* изображение, координатная привязка, древовидное представление, многоуровневое разрешение, быстрый поиск.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей представляется координатная привязка фрагментов растрового изображения, т. е. определение по предъявленному тестовому фрагменту его позиции на некотором известном изображении [Козлов, 2009]. Один из подходов к ее решению — формирование на основе исходного изображения множества эталонных фрагментов, среди которых ищется наиболее похожий на тестовый. Для обеспечения приемлемой скорости решения задачи необходимо использовать представления фрагментов, допускающих эффективный алгоритм сравнения. На множестве представлений должна быть введена мера различия, обладающая свойством компактности и инвариантностью по отношению к различным преобразованиям фрагментов. В работе исследуется метод сравнения фрагментов, основанный на их представлении в виде эллиптических примитивов [Ganebnukh, Lange, 2009]. Такие представления инвариантны по отношению к поворотам и линейным преобразованиям яркости, а древовидная структура позволяет организовать быстрый поиск на множестве эталонов благодаря использованию нескольких уровней разрешения.

---

Ланге Михаил Михайлович — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: lange\_mm@ccas.ru.

Новиков Никита Александрович — аспирант, e-mail: nikknovikov@gmail.com.

## ПРОСТРАНСТВО ДРЕВОВИДНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ФРАГМЕНТОВ

### Построение представлений

В качестве тестовых и эталонных фрагментов в данной работе используются области исходного изображения, имеющие форму кругов одинакового диаметра (рис. 1). Для каждого фрагмента строится представление в виде бинарного дерева эллиптических примитивов в соответствии с методом, описанным в [Ganebnykh, Lange, 2009].

Метод основан на дихотомическом разбиении представляемого изображения на непересекающиеся сегменты и аппроксимации сегментов эллиптическими примитивами. В результате для каждого фрагмента  $A$  строится последовательность представлений  $A^L = (a^0, \dots, a^l, \dots, a^L)$ , в которой представление  $l$ -го уровня образовано множеством примитивов

$$a^l = \{Q_n = (\mathbf{r}_n, \mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n, z_n)\}, \quad n = 2^l - 1, \dots, 2^{l+1} - 2, \quad (1)$$

где  $n$  — номер примитива;  $\mathbf{r}_n$  — вектор центра примитива;  $\mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n$  — векторы ориентации примитива;  $z_n$  — значение яркости примитива. Последовательность  $A^L$  образует полное бинарное дерево глубины  $L$ , узлы которого соответствуют примитивам  $Q_n$ , а  $l$ -й уровень образован множеством  $a^l$  мощности  $\|a^l\| = 2^l$  (рис. 2а). Точность (разрешение) представления  $a^l$  определяется числом содержащихся в нем примитивов и увеличивается с ростом уровня  $l$ . Векторы  $\mathbf{r}_n, \mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n$  в (1) определяются соответственно центром тяжести, максимальным и минимальным осевыми моментами инерции сегмента разбиения с номером  $n$ , а величина  $z_n$  — средней яркостью пикселей этого сегмента. Каждый неконцевой сегмент с номером  $n$  разбивается осью  $\mathbf{v}_n$  на два сегмента с номерами  $2n + 1, 2n + 2$ . Корневой примитив  $Q_0$  дает представление нулевого уровня  $a^0$ . Последовательность  $A^L = (a^0, \dots, a^L)$

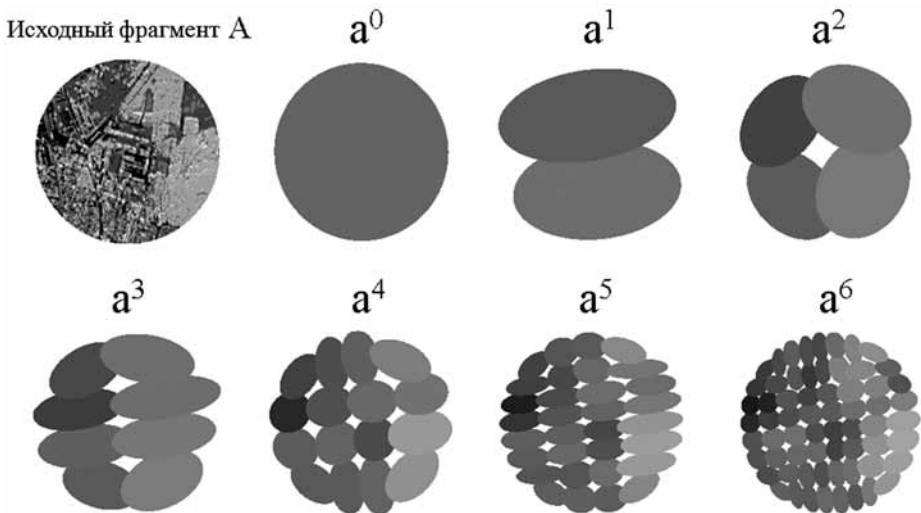


Рис. 1. Пример фрагмента изображения и его представлений эллиптическими примитивами для семи уровней разрешения

образует поддерево примитивов глубины  $l$ . Параметры  $\mathbf{r}_n$ ,  $\mathbf{u}_n$ ,  $\mathbf{v}_n$  эллиптических примитивов в (1) вычисляются в собственных координатах исходного кругового фрагмента, а уровни яркости  $z_n$  нормируются на величину яркости  $z_0$  корневого примитива, что обеспечивает инвариантность представлений  $a^l$ ,  $l = 0, \dots, L$ , к повороту и линейному преобразованию яркости исходного фрагмента  $A$ . Пример фрагмента изображения  $A$  и его представлений  $a^l$  при  $l = 0, \dots, 6$  дан на рис. 1.

### Мера на множестве древовидных представлений

Пусть даны два изображения  $A$  и  $\hat{A}$ , представленные деревьями  $A^L = \{Q_n\}$  и  $\hat{A}^L = \{\hat{Q}_n\}$  соответственно. Введем меру различия для пары соответственных примитивов  $Q_n, \hat{Q}_n$  с параметрами, определенными в (1):

$$\rho(Q_n, \hat{Q}_n) = \frac{1}{3} \left[ \frac{\|\mathbf{r}_n - \hat{\mathbf{r}}_n\|}{\max(\|\mathbf{r}_n\|, \|\hat{\mathbf{r}}_n\|)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\|\mathbf{u}_n - \hat{\mathbf{u}}_n\|}{\max(\|\mathbf{u}_n\|, \|\hat{\mathbf{u}}_n\|)} + \frac{\|\mathbf{v}_n - \hat{\mathbf{v}}_n\|}{\max(\|\mathbf{v}_n\|, \|\hat{\mathbf{v}}_n\|)} \right) + \frac{|z_n - \hat{z}_n|}{\max(z_n, \hat{z}_n)} \right].$$

Тогда мера различия  $l$ -го порядка для пары изображений  $A, \hat{A}$  может быть задана в виде взвешенной суммы значений  $\rho(Q_n, \hat{Q}_n)$  по всем парам соответственных примитивов, которые входят в поддеревья  $A^l \in A^L, \hat{A}^l \in \hat{A}^L$ , за исключением корневых примитивов. Эта мера имеет вид:

$$d_l(A, \hat{A}) = \sum_{n=1}^{2^{l+1}-2} w_n \rho(Q_n, \hat{Q}_n), \quad (2)$$

где  $w_n = \lceil \log_2(n+1) \rceil 2^{-\lceil \log_2(n+1) \rceil}$  — весовой коэффициент, определяемый уровнем, на котором расположены примитивы  $Q_n$  и  $\hat{Q}_n$  в соответствующих поддеревьях  $A^l$  и  $\hat{A}^l$ . В силу аддитивности формы (2) мера  $l + 1$ -го порядка вычисляется рекурсивно суммированием меры  $l$ -го порядка с  $2^{l+1}$  слагаемыми, порождаемыми парой представлений  $a^{l+1}$  и  $\hat{a}^{l+1}$ .

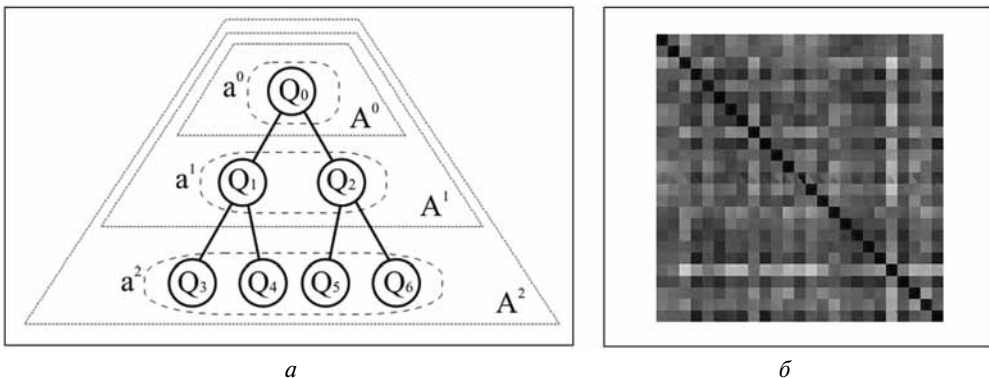


Рис. 2. Бинарное дерево примитивов (а); иллюстрация компактности меры (б)

Для иллюстрации компактности меры (2) была проведена следующая процедура. На исходном изображении случайным образом выбиралось 25 квадратных областей размером  $10 \times 10$  пикселей, и рассматривались всевозможные круговые фрагменты диаметром 200 пикселей, центры которых лежат внутри этих областей. Для каждого фрагмента вычислялась мера различия порядка  $l=6$  с 25-ю фрагментами, центры которых совпадают с центрами указанных областей. Результат приведен на рис. 2б: строки «матрицы» соответствуют 25-ти областям, столбцы — 25-ти центральным фрагментам; мера различия обозначена яркостью. Видно, что значения различий фрагментов, центры которых принадлежат одной и той же области (блоки, расположенные вдоль диагонали «матрицы»), меньше различий фрагментов, центры которых принадлежат разным областям.

### ПОИСК НА МНОЖЕСТВЕ ДРЕВОВИДНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

После того как построено древовидное представление для тестового фрагмента, необходимо сравнить его с множеством представлений эталонов и найти наиболее похожий. Пусть их глубина —  $L$ , а число эталонов —  $c$ . При переборном поиске ближайшего эталона по мере (2)  $L$ -го порядка используются все примитивы, кроме корневого, поэтому для каждого эталона необходимо сравнить  $(2^{L+1} - 2)$  пар примитивов. Тогда время переборного поиска определяется формулой

$$T = t_{cmp} c (2^{L+1} - 2), \quad (3)$$

где  $t_{cmp}$  — время сравнения пары примитивов.

Поиск на множестве эталонов можно ускорить, если использовать уровни разрешения  $l = 1, \dots, L$  и последовательно отбрасывать на каждом уровне наименее похожие эталоны по мере (2). В работе предложена процедура направленного поиска, при котором на каждом уровне с номером  $l = 1, \dots, L$  число эталонов, для которых вычисляется мера (2), равно  $c_l = \lfloor c 2^{-\beta(l-1)} \rfloor$ . Тогда с учетом рекурсивности вычисления меры верхняя оценка времени, затрачиваемого на сравнение представлений при направленном поиске, определяется неравенством

$$T_{cmp}^{dir} \leq t_{cmp} c \sum_{l=1}^L 2^{(1-\beta)(l-1)}. \quad (4)$$

Помимо операций сравнения, на каждом уровне  $l = 1, \dots, L - 1$ , в массиве значений меры, содержащем  $\lfloor c 2^{-\beta(l-1)} \rfloor$  элементов, необходимо отобрать  $\lfloor c 2^{-\beta l} \rfloor$  наименьших элементов. Используя алгоритм VFPRT, задача отбора  $n'$  наименьших элементов в массиве длины  $n$  решается за время, линейно зависящее от  $n$  и не зависящее от  $n'$  [Blum et al., 1973]. Если обозначить время такого отбора в пересчете на один элемент как  $t_{sel}$ , то верхняя оценка времени отбора элементов при выполнении направленного поиска имеет вид

$$T_{sel}^{dir} \leq t_{sel} c \sum_{l=1}^{L-1} 2^{-\beta(l-1)}. \quad (5)$$

Оценка сверху для полного времени направленного поиска  $T^{dir}$  получается суммированием оценок (4) и (5).

Вычислительный выигрыш определяется отношением времен переборного и направленного поиска. С учетом (4) и (5) нижняя граница выигрыша имеет следующий вид

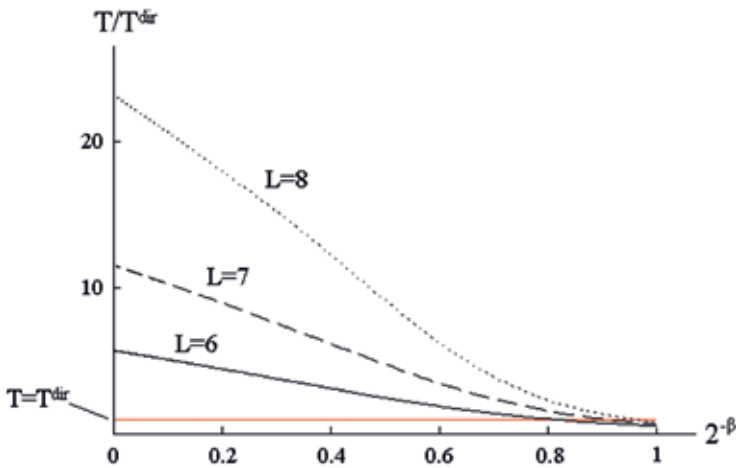


Рис. 3. Соотношение времени переборного и направленного поиска эталонов

$$\frac{T}{T^{dir}} \geq \frac{\frac{t_{cmp}}{t_{sel}} (2^{L+1} - 2)}{\frac{t_{cmp}}{t_{sel}} \sum_{l=1}^L 2^{(1-\beta)(l-1)+1} + \sum_{l=1}^{L-1} 2^{-\beta(l-1)}},$$

где  $t_{cmp}/t_{sel} = 0,05$  при реализации алгоритмов средствами стандартной библиотеки языка C++. На рис. 3 приведены графики нижней границы выигрыша  $T/T^{dir}$  от величины  $2^{-\beta}$  при различных значениях параметра  $L$ .

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работоспособность предлагаемого метода продемонстрирована на примере решения задачи координатной привязки фрагментов полутонового снимка земной поверхности, полученного средствами Google Earth. В качестве фрагментов использовались области в виде кругов диаметром 200 пикселей. На каждый тестовый фрагмент накладывался гауссов шум с нулевым математическим ожиданием и интенсивностью (среднеквадратичным отклонением)  $N$ . Использовались значения  $N$ , равные 20, 40, 60 и 80 единицам яркости.

Значение ошибки позиционирования вычислялось как среднее расстояние между центрами тестового и найденного эталонного фрагментов. Для оценки ошибки на исходном изображении случайным образом выбирались 10 областей размером  $32 \times 32$  пикселя. Вычисления производились независимо для каждой области с последующим усреднением результатов. Тестовое множество для каждой области содержало 200 случайно выбранных фрагментов с центрами, лежащими в этой области, а множество эталонов было образовано всеми такими фрагментами. Заметим, что исследование ошибки в пределах локальных областей оправдано, поскольку в реальных условиях может быть организована процедура, при которой на первом этапе осуществляется грубое позиционирование с точностью до центра окрестности, где ведется дальнейший поиск.

В таблице приведены значения ошибки, полученные с применением процедуры ненаправленного поиска, т. е. путем перебора всех эталонов для каждого тестового фрагмента. Из данных таблицы следует, что ошибка растет с увеличением зашумленности тестовых фрагментов  $N$  и уменьшается с ростом глубины деревьев представлений  $L$ . Кроме того, при приближении глубины к значению  $L = 8$  ошибка перестает существенно меняться.

**Ошибка позиционирования (среднее расстояние  $\pm$ СКО)**

	$N = 20$	$N = 40$	$N = 60$	$N = 80$
$L = 1$	1,34 $\pm$ 1,42	2,88 $\pm$ 2,86	6,06 $\pm$ 5,05	9,87 $\pm$ 6,76
$L = 2$	0,77 $\pm$ 0,79	1,57 $\pm$ 1,34	2,89 $\pm$ 2,22	5,45 $\pm$ 4,05
$L = 3$	0,58 $\pm$ 0,72	1,24 $\pm$ 1,13	2,27 $\pm$ 1,83	4,17 $\pm$ 3,18
$L = 4$	0,45 $\pm$ 0,67	1,06 $\pm$ 0,99	1,91 $\pm$ 1,47	3,23 $\pm$ 2,42
$L = 5$	0,34 $\pm$ 0,62	0,85 $\pm$ 0,91	1,54 $\pm$ 1,27	2,54 $\pm$ 1,92
$L = 6$	0,32 $\pm$ 0,61	0,72 $\pm$ 0,87	1,28 $\pm$ 1,16	1,97 $\pm$ 1,56
$L = 7$	0,28 $\pm$ 0,59	0,66 $\pm$ 0,87	1,19 $\pm$ 1,14	1,77 $\pm$ 1,48
$L = 8$	0,28 $\pm$ 0,58	0,61 $\pm$ 0,85	1,10 $\pm$ 1,09	1,68 $\pm$ 1,41

При проведении эксперимента с процедурой направленного поиска использовались деревья глубины  $L = 8$ . Исследовался относительный рост ошибки  $\varepsilon_{dir}/\varepsilon$ , т. е. отношение ошибки направленного поиска к ошибке переборного поиска при сравнении деревьев максимальной глубины (рис. 4). Поскольку при сужении области поиска на уровне наибольшего разрешения с номером  $L$  должно быть не менее одного эталона, возможные значения коэффициента  $\alpha = 2^{-\beta}$  ограничиваются условием:  $\alpha > c^{1/(1-L)}$ . Величины  $\varepsilon_{dir}/\varepsilon$  вычислены при значениях  $\alpha$  из диапазона от 0,4 до 1.

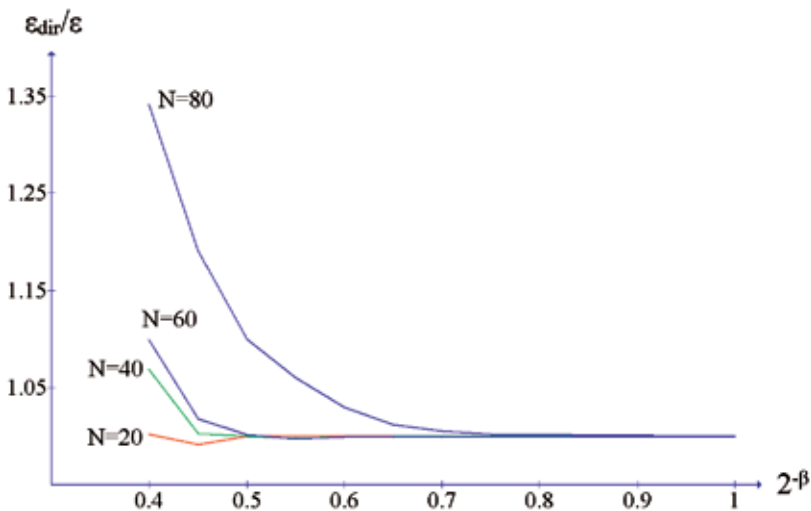


Рис. 4. Относительный рост ошибки при использовании направленного поиска

Результаты вычислений приведены на рис. 4. Из графиков следует, что для случая  $N = 80$  заметный рост ошибки начинается при  $2^{-\beta} = 0,75$ , что соответствует трехкратному выигрышу во времени (см. рис. 3). Для случаев  $N = 40$  и  $N = 60$  рост ошибки начинается при  $2^{-\beta} = 0,5$ , что соответствует уменьшению времени поиска в 9 раз. При  $N = 20$  существенного роста ошибки не наблюдалось.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование метода координатной привязки фрагментов изображения, основанного на представлении фрагментов в виде деревьев эллиптических примитивов и дальнейшем их сравнении. Предложен способ ускорения поиска фрагментов за счет сравнения представлений с многоуровневым разрешением. Проведена серия экспериментов с фрагментами полутонного снимка земной поверхности, центры которых выбирались из областей размером  $32 \times 32$  пиксела. Установлено, что средняя ошибка позиционирования перестает существенно меняться при глубине деревьев равной 8, и оценивается величиной 0,28 пикселей (при слабом шуме) и величиной 1,68 пикселей (при сильном шуме). Использование процедуры направленного поиска позволило сократить расчетное время в 3 раза при умеренном шуме и в 9 раз при сильном без заметного понижения точности позиционирования. В дальнейшем предполагается испытать метод на большем объеме данных, а также сравнить его с методами, использующими более простые древовидные представления фрагментов.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Козлов, 2009] *Козлов Е. П.* Алгоритмы и технология высокоточной координатной привязки снимков от геостационарных космических систем по электронным картам: Дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2009. [Электрон. текст]. Режим доступа: [www.dissercat.com/.../algoritmy-i-tehnologiya-vysokotochnoi-koor](http://www.dissercat.com/.../algoritmy-i-tehnologiya-vysokotochnoi-koor).
- [Blum et al., 1973] *Blum M., Floyd R. W., Pratt V., Rivest R. L., Tarjan R. E.* Time Bounds for Selection // *J. Computer and System Sciences*. 1973. V. 7. N. 4. P. 448–460.
- [Ganebnykh, Lange, 2009] *Ganebnykh S. N., Lange M. M.* Classification of 2D Grayscale Objects in a Space of Multiresolution Representations // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2009. V. 19. N. 4. P. 591–602.

### MULTIRESOLUTION DATA REPRESENTATION FOR FAST IMAGE GRIDGING

M. M. Lange<sup>1</sup>, N. A. Novikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Dorodnicyn Computing Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>2</sup> *Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation, Moscow*

In this paper, we present a new method for fast gridding the image fragments to the template fragments that describe a given image. The fragment representations are constructed in a form of the tree-structured collections of elliptic primitives and a dissimilarity measure is defined in the set of the representations. Using a multiresolution property of the image fragment representations, a fast algorithm of search for



the nearest template with respect to a submitted fragment is suggested. The experiments on gridding the noisy fragments of the satellite Earth image have been conducted. The experimental dependences of gridding accuracy on the resolution and noise levels are obtained. A profit in computational complexity of the fast search algorithm for the decision template as against the exhaustive search algorithm is shown.

*Keywords:* image, gridding, tree-structured representation, multiresolution, fast search.

---

**Lange Mikhail Mikhailovich** — leading researcher, PhD, associate professor, e-mail: lange\_mm@ccas.ru.

**Novikov Nikita Alexandrovich** — post graduate student, e-mail: nikknovikov@gmail.com.

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ  
КОРРЕЛЯЦИИ ФОРМ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ  
МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ**

**Ю. В. Визильтер<sup>1</sup>, О. В. Выголов<sup>1</sup>, А. Ю. Рубис<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»  
(ФГУП «ГосНИИАС»), Москва*

<sup>2</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет) (МАИ), Москва*

Рассмотрена проблема сравнения форм сегментированных разносспектральных изображений, описываемых разбиениями кадра на непересекающиеся связные области равной интенсивности. Предложен способ морфологического сравнения форм-разбиений на основе статистического усреднения проецируемых изображений. Предложены нормированные коэффициенты симметричной геометрической корреляции форм-разбиений. Показано, что предложенные коэффициенты корреляции могут использоваться для взаимной привязки фрагментов разносспектральных видеоданных.

*Ключевые слова:* анализ многоспектральных изображений, морфологическая корреляция, комплексирование.

**ВВЕДЕНИЕ**

При совместной обработке двумерных данных, полученных в различных спектральных диапазонах, как правило, производится взаимная геометрическая привязка изображений, после чего тем или иным способом оценивается их сходство и выделяются различия с целью дальнейшего анализа или визуального комплексирования. Известно, что конкретные значения яркости для таких изображений оказываются принципиально различными, в то время как общая *форма* изображения (разбиения кадра на области сходной яркости) в целом сохраняется для аналогичных участков сцены. Таким образом, проблема сравнения форм сегментированных разносспектральных изображений, описываемых как разбиения кадра на связные области, остается центральной математической и алгоритмической проблемой в области визуального комплексирования многоспектральной видеoinформации.

В данной работе представлен новый подход к сравнению формы сегментированных изображений, основанный на обобщении и модификации Пытьевских морфологических коэффициентов корреляции [Пытьев, Чуличков, 2010].

---

**Визильтер Юрий Валентинович** — начальник подразделения, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: viz@gosniias.ru.

**Выголов Олег Вячеславович** — начальник лаборатории, кандидат технических наук, e-mail: o.vygotov@gosniias.ru.

**Рубис Алексей Юрьевич** — аспирант, e-mail: arcelt@mail.ru.

### ЗАДАЧА СРАВНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Классический подход к сравнению изображений предполагает, что изображения рассматриваются как элементы гильбертова пространства  $L^2(\Omega)$  функций с интегрируемым квадратом, и, следовательно, могут быть определены *скалярное произведение* (1), *норма* (2) и *евклидово расстояние* (3) между изображениями

$$f(x, y): \Omega \subset R, \Omega \subset R^2, (f, g) = \int_{\Omega} \int_{\Omega} f(x, y) g(x, y) dx dy. \quad (1)$$

$$\|f\| = \sqrt{(f, f)}, \quad (2)$$

$$d_E(f, g) = \|f - g\|. \quad (3)$$

Это расстояние характеризует различия между изображениями как функциями яркости. Поэтому для того, чтобы сравнивать изображения инвариантно к линейным преобразованиям яркости, как правило, вводится *нормированный коэффициент линейной корреляции* вида

$$K_N(f, g) = \frac{(f, g)}{\|f\| \|g\|}.$$

В дальнейшем будем предполагать, где специально не оговорено обратное, все рассматриваемые изображения центрированы по яркости.

В рамках простейшей *морфологии Пытьева* [Пытьев, Чуличков, 2010] изображения рассматриваются как кусочно-постоянные функции вида

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n f_i \chi_{F_i}(x, y),$$

где  $n$  — число областей *разбиения*  $\mathbf{F}$  кадра  $\Omega$  на связные непересекающиеся области постоянной яркости;  $\mathbf{F} = \{F_1, \dots, F_n\}, f = (f_1, \dots, f_n)$  — вектор действительных значений яркости, соответствующих каждой области разбиения;  $\chi_{F_i}(x, y) \in \{0, 1\}$  — характеристическая функция  $i$ -й области яркости:

$$\chi_{F_i}(x, y) = \{1, \text{ if } (x, y) \in F_i; 0, \text{ otherwise}\}.$$

*Множество изображений одной формы* разбиения кадра  $\mathbf{F}$  в таком случае образует выпуклое и замкнутое подпространство  $F \subseteq L^2(\Omega)$ :

$$\mathbf{F} = \left\{ f(x, y) = \sum_{i=1}^n f_i \chi_{F_i}(x, y), \mathbf{f} \in R^n \right\}.$$

Для любого изображения  $g(x, y) \in L^2(\Omega)$  может быть определена *проекция на форму F*:

$$g_F(x, y) = P_F g(x, y) = \sum_{i=1}^n g_i \chi_{F_i}(x, y),$$

$$g_i = \frac{(\chi_{F_i}, g)}{\|\chi_{F_i}\|^2}, \quad i = 1, \dots, n,$$

Для дальнейших построений важно также, что Пытьевские формы образуют алгебраическую структуру типа «решетка», в которой для любых двух форм  $F$  и  $G$

можно указать форму *более сложную*  $F \wedge G$  и *менее сложную*  $F \vee G$ . Более сложные формы получаются из менее сложных разбиением, а менее сложные из более сложных — слиянием областей.

Морфологическое сравнение изображений  $f(x,y)$  и  $g(x,y)$  в рамках морфологии Пытьева осуществляется при помощи *морфологических квазирасстояний*

$$d_M(g, F) = \|g - P_F g\|, \quad d_M(f, G) = \|f - P_G f\|$$

и нормированных морфологических коэффициентов корреляции Пытьева:

$$K_M(g, F) = \frac{\|P_F g\|}{\|g\|}, \quad K_M(f, G) = \frac{\|P_G f\|}{\|f\|}. \quad (4)$$

Здесь в первом случае изображение  $g$  сравнивается с формой изображения  $f$ , во втором случае, наоборот, изображение  $f$  сравнивается с формой изображения  $g$ . Легко убедиться, что в общем случае  $K_M(g, F) \neq K_M(f, G)$ .

В самом общем смысле можно сказать, что линейный коэффициент корреляции  $K_N(f, g)$  сравнивает изображения  $f(x, y)$  и  $g(x, y)$  как функции яркости, в то время как  $K_M(f, G)$  характеризует корреляцию между яркостью изображения  $f(x, y)$  и его геометрической формой  $g(x, y)$ . Иными словами, это разные типы корреляции изображений — чисто *яркостная* и *яркостно-геометрическая*. В следующем разделе будет введен еще один тип корреляции изображений — чисто *геометрический*.

### МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ФОРМ-РАЗБИЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО УСРЕДНЕНИЯ ПРОЕЦИРУЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Каждой паре «образ-проекция» соответствует свой морфологический коэффициент корреляции (4). Пусть изображения из  $F$  представляют собой кусочно-постоянные функции вида

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n f_i \chi_{F_i}(x, y),$$

где  $n$  — число областей *разбиения*  $\mathbf{F}$  кадра  $\Omega$  на связные непересекающиеся области постоянной яркости,  $\mathbf{F} = \{F_1, \dots, F_n\}$ ,  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)$  — вектор действительных значений яркости, соответствующих каждой области разбиения;  $\chi_{F_i}(x, y) \in \{0, 1\}$  — характеристическая функция  $i$ -й области яркости:

$$\chi_{F_i}(x, y) = \{1, \text{ if } (x, y) \in F_i; 0, \text{ otherwise}\}.$$

И пусть изображения из  $G$  представляют собой аналогичные функции вида

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^m g_i \chi_{G_i}(x, y)$$

где  $m$  — число областей *разбиения*  $\mathbf{G} = \{G_1, \dots, G_m\}$ ;  $\mathbf{g} = (g_1, \dots, g_m)$  — вектор действительных значений яркости;  $\chi_{G_j}(x, y) \in \{0, 1\}$  — характеристическая функция  $j$ -й области яркости.

Введем дополнительно следующие обозначения:  $S$  — площадь кадра  $\Omega$ ;

$S_i = \|\chi_{F_i}(x, y)\|^2$  — площадь области разбиения  $F_i$ ;  $S_j = \|\chi_{G_j}(x, y)\|^2$  — площадь области разбиения  $G_j$ ;  $S_{ij} = (\chi_{F_i}(x, y), \chi_{G_j}(x, y))$  — площадь пересечения  $F_i \cap G_j$ .

С учетом этих обозначений можно записать:

$$\|f\|^2 = \sum_{i=1}^n f_i^2 S_i, \quad \|f_G\|^2 = \sum_{i=1}^n f_{G_j}^2 S_j,$$

где  $f_{G_j} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i S_{ij}}{S_j}, j = 1, \dots, m.$

Кроме того, введем следующие предположения о плотностях распределении величин  $f_1, \dots, f_n: p(f_1, \dots, f_n) = p(f_1) \dots p(f_n)$  — величины  $f_1, \dots, f_n$  независимы в совокупности;  $p(f_1) = \dots = p(f_n)$  — величины  $f_1, \dots, f_n$  распределены одинаково;  $\forall i = 1, \dots, n: p(f_i) = p(-f_i)$  — величины  $f_1, \dots, f_n$  распределены симметрично относительно 0.

Из перечисленных условий, в частности, сразу следует, что математическое ожидание всех яркостей в данной модели нулевое:  $\langle f_i \rangle = 0$ , а парная ковариация имеет вид:  $\langle f_i f_k \rangle = \{\sigma^2, \text{ if } i = k; 0 \text{ otherwise}\}$ , где  $\sigma$  — дисперсия распределения  $p(f_i)$ .

С учетом введенных предположений и обозначений *средний квадрат нормы изображения  $f$  формы  $F$  и средний квадрат нормы проекции изображения  $f$  формы  $F$  на форму  $G$*  имеют вид (5) и (6) соответственно:

$$\langle \|f\|^2 \rangle = \sigma^2 \sum_{i=1}^n S_i = \sigma^2 S \tag{5}$$

$$\langle \|f_G\|^2 \rangle = \sigma^2 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{S_{ij}^2}{S_j}. \tag{6}$$

*Среднеквадратичный эффективный коэффициент морфологической корреляции (СКМК) форм  $F$  и  $G$*  определяется, как:

$$K_M^2(F, G) = \frac{\langle \|f_G\|^2 \rangle}{\langle \|f\|^2 \rangle}.$$

Подставляя соответствующие выражения, получим:

$$K_M^2(F, G) = \sum_{j=1, \dots, m} \sum_{i=1, \dots, n} \frac{S_{ij} S_{ij}}{S S_j} = \sum_{j=1, \dots, m} \sum_{i=1, \dots, n} K_{\Omega}(F_i, G_j) K_M^2(G_j, F_i), \tag{7}$$

где  $K_{\Omega}(F_i, G_j) = S_{ij}/S$  — нормированный коэффициент значимости пары областей  $F_i$  и  $G_j$  для оценки сходства разбиений  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{G}$  (он тем выше, чем больше площадь  $F_i \cap G_j$ );  $K_M^2(G_j, F) = S_{ij}/S_j$  — квадрат нормированного морфологического коэффициента парной корреляции пары областей  $F_i$  и  $G_j$ .

Легко также убедиться в справедливости следующих свойств СКМК:

$$K_M(F, G) \in [0, 1]; \quad K_M(F, F) = 1; \\ K_M(F, F \wedge G) = 1; \quad \forall G \neq F: K_M(F \wedge G, F) < 1.$$

Таким образом, предложенный подход к морфологическому сравнению форм-разбиений на основе статистического усреднения проецируемых изобра-

жений показал свою эффективность и возможность сравнения форм разбиения кадра как таковых.

### МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ФОРМ-РАЗБИЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО УСРЕДНЕНИЯ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрим теперь аналогичную задачу построения эффективного *центрированного* морфологического коэффициента корреляции Пытьева:

$$K_M(f - f_0, G) = \frac{\|P_G f - f_0\|}{\|f - f_0\|}, \quad f_0 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i S_i}{S}.$$

где  $f_0$  средняя яркость по изображению  $f$ .

С учетом введенных вероятностных предположений *средний квадрат нормы центрированного изображения* формы  $F$  имеет вид:

$$\langle \|f - f_0\|^2 \rangle = \sigma^2 \left( S - \frac{2}{S} \sum_{i=1}^n S_i^2 + \frac{1}{S^2} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n S_i S_j^2 \right).$$

Средний квадрат нормы проекции центрированного изображения формы  $F$  на форму  $G$  имеет вид:

$$\langle \|P_G f - f_0\|^2 \rangle = \langle \|f_G - f_0\|^2 \rangle = \sigma^2 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left( \frac{S_{ij}}{S_j} - \frac{S_i}{S} \right)^2.$$

Среднеквадратичный эффективный коэффициент морфологической корреляции с центрированием (СКМКЦ) определяется, как:

$$K_{MC}^2(F, G) = \frac{\langle \|f_G - f_0\|^2 \rangle}{\langle \|f - f_0\|^2 \rangle}.$$

Подставляя соответствующие выражения, получим:

$$K_{MC}^2(F, G) = \frac{\sum_{j=1, \dots, m} \frac{S_j}{S} \sum_{i=1, \dots, n} \left( \frac{S_{ij}}{S_j} - \frac{S_i}{S} \right)^2}{1 - \sum_{i=1, \dots, n} \left( \frac{S_i}{S} \right)^2}. \quad (8)$$

Выражение не такое компактное, как (7), но после упрощения и подстановки (7) в (8) получим:

$$K_{MC}^2(F, G) = \frac{K_M^2(F, G) - \sum_{i=1, \dots, n} \left( \frac{S_i}{S} \right)^2}{1 - \sum_{i=1, \dots, n} \left( \frac{S_i}{S} \right)^2}.$$

Если формы  $G$  и  $F$  независимы в смысле Пытьева (т. е. проекции их центрированных изображений друг на друга нулевые), то  $K_{MC}(F, G) = 0$ . Кроме того, поскольку при  $n=1$  знаменатель данного выражения обращается в 0, то для пустой (нулевой) формы  $O$  коэффициент СКМКЦ не определен (как и линейный центрированный коэффициент корреляции не определен для изображений постоянной яркости).

### СИММЕТРИЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ФОРМ-РАЗБИЕНИЙ

Построенные коэффициенты среднеквадратичной эффективной морфологической корреляции обладают асимметрией по отношению к формам, упорядоченным по сложности. Между тем, на практике часто более желательной представляется симметрия оценки близости изображений.

Симметричный морфологический коэффициент парной геометрической корреляции областей  $F_i$  и  $G_j$  можно определить, например, следующим образом:

$$K_{MS}(F_i, G_j) = \frac{\|f_i \cap g_j\|^2}{\|f_i \cup g_j\|^2} = \frac{S_{ij}}{S_i + S_j - S_{ij}}.$$

Тогда по аналогии с СКМК (7) можно ввести симметричный коэффициент геометрической корреляции (СКГК) форм  $F$  и  $G$ , определяемый выражением:

$$K_{MS}(F, G) = \frac{1}{S} \sum_{j=1, \dots, m} \sum_{i=1, \dots, n} \frac{S_{ij}^2}{S_i + S_j - S_{ij}} = \sum_{j=1, \dots, m} \sum_{i=1, \dots, n} K_{\Omega}(F_i, G_j) K_{MS}(G_j, F_i)$$

Легко убедиться в справедливости следующих свойств СКГК:

$$K_{MS}(F, G) \in [0, 1]; \quad K_{MS}(F, F) = 1; \quad K_{MS}(F, G) = K_{MS}(G, F).$$

Можно предложить и иной способ построения симметричного коэффициента геометрической корреляции, положив в его основу симметричный линейный коэффициент парной геометрической корреляции областей  $F_i$  и  $G_j$ :

$$K_N(F_i, G_j) = \frac{(\chi_{F_i}, \chi_{G_j})}{\|\chi_{F_i}\| \|\chi_{G_j}\|} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}},$$

Тогда симметричный коэффициент линейной корреляции (СКЛК) форм  $F$  и  $G$  будет определяться выражением

$$K_N(F, G) = \frac{1}{S} \sum_{j=1, \dots, m} \sum_{i=1, \dots, n} \frac{S_{ij}^2}{\sqrt{S_i S_j}} = \sum_{j=1, \dots, m} \sum_{i=1, \dots, n} K_{\Omega}(F_i, G_j) K_N(G_j, F_i)$$

Отметим, что свойства СКЛК идентичны свойствам СКГК.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ СРАВНЕНИЯ ФОРМЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Описанные выше меры сходства формы изображений были программно реализованы и протестированы на базе модельных и реальных изображений ТВ-

*ТВ-диапазон*



$$K_M = 0,94927; K_{MC} = 0,30295;$$

*ИК-диапазон*



$$K_{MS} = 0,80795; K_N = 0,85931.$$



$$K_M = 0,88485; K_{MC} = 0,46120;$$



$$K_{MS} = 0,69532; K_N = 0,78412.$$

Сравнение форм изображений спектральных диапазонов ТВ и ИК

и ИК-диапазонов. Примеры оценки сходства изображений ТВ- и ИК-диапазонов приведены на рисунке.

Результаты проведенных первичных исследований показали достаточную степень адекватности получаемых оценок сходства и различия формы разнеспектральных изображений, что позволяет практически использовать данные коэффициенты корреляции как для взаимной привязки фрагментов разнеспектральных видеоданных, так и для выделения отличающихся по форме фрагментов при создании комплексных изображений, объединяющих информацию, поступающую из различных каналов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описан способ морфологического сравнения форм-разбиений на основе статистического усреднения проецируемых изображений, и получено выражение для среднеквадратичного эффективного коэффициента морфологической корреляции форм-разбиений. Также представлены нормированные коэффициенты симметричной геометрической корреляции форм-разбиений и показано, что предложенные коэффициенты корреляции могут использоваться как для взаимной привязки фрагментов разнеспектральных видеоданных, так и для выделения отличающихся по форме фрагментов при создании комплексных изображений, объединяющих информацию, поступающую из различных каналов.



## ЛИТЕРАТУРА

[Пытьев, Чуличков, 2010] *Пытьев Ю. П., Чуличков А. И.* Методы морфологического анализа изображений. М.: Физматлит, 2010. 336 с.

### MORPHOLOGICAL SHAPE CORRELATION FOR MULTISPECTRAL IMAGE FUSION

**Yu. V. Vizilter**<sup>1</sup>, **O. V. Vigolov**<sup>1</sup>, **A. Yu. Rubis**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *FGUP "State Research Institute of Aviation Systems", Moscow*

<sup>2</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow*

The problem of shape comparison is addressed for segmented images described by connected non-intersected regions of homogeneous intensity. Morphological shape correlation coefficients are proposed based on statistical averaging of asymmetric Pytiev morphological correlation. Symmetrical shape correlation coefficients are proposed in analogous way. Proposed shape correlation coefficients are demonstrated to be useful for multispectral image matching.

*Keywords:* multispectral image analysis, morphological correlation, image fusion.

---

**Vizilter Yuri V.** — head of department, dr. sci (phys.-math.), senior researcher, e-mail: viz@gosniias.ru.

**Vigolov Oleg V.** — head of laboratory, cand. sci. (tech.), e-mail: o.vygodov@gosniias.ru.

**Rubis Aleksey Yu.** — engineer, e-mail: arcelt@mail.ru.

## БИЦИКЛИЧЕСКИЕ КАРКАСЫ ДВУМЕРНЫХ ФИГУР

Ю. В. Визильтер<sup>1</sup>, С. В. Сидякин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП ГосНИИАС), Москва

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва

Работа посвящена математической формализации понятия каркаса двумерных фигур с использованием бициклов (составная фигура из двух касающихся кругов).

*Ключевые слова:* математическая морфология, бициклы, каркасы, скелеты, анализ изображений.

### ВВЕДЕНИЕ

Фигуры, составленные из вытянутых элементов — так называемых «жирных линий» — могут быть описаны их центральными линиями, составляющими связный одномерный планарный граф, называемый «скелетом». Однако в случае, если фигура состоит не только из «жирных линий», но и из «существенно объемных», невытянутых частей, более адекватным представляется их описание в виде «каркаса», включающего как одномерные ребра, так и более массивные элементы.

В работе предлагается такая формализация понятия двумерного «каркаса», чтобы, с одной стороны, оно было столь же математически точным, как понятие «скелета», а с другой стороны, позволяло автоматически учитывать локальные соотношения длины и ширины элементов фигуры с тем, чтобы существенно двумерные части можно было отличать от «жирных линий».

### БИЦИКЛИЧЕСКИЙ КАРКАС ПЛОСКОЙ ФИГУРЫ

В основе идеи построения бициклического каркаса плоской фигуры составная фигура из двух кругов (bicycle, *бицикл*) (рис. 1). Такая фигура имеет ориентацию и удлинение как у эллипса (что позволяет отличать «жирные линии» от «массивных фигур»), а также «заострение» как у овалов Кассини (чтобы указывать в сторону сужения «жирной линии»).

Под *бициклом* будем понимать объединение пары непересекающихся кругов (в общем случае различного радиуса), касающихся друг друга. *Центром* бицикла назовем точку касания кругов, *пустым бициклом* — пару касающихся максимальных пустых кругов (рис. 2), *бициклическим каркасом* плоской фигуры — множеством всех точек касания всех пустых кругов этой фигуры.

Из этого определения следует очевидный *алгоритм 1* построения бициклического каркаса:

- построить скелет  $Sk(A)$  фигуры  $A$ ;

---

Визильтер Юрий Валентинович — начальник подразделения, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: viz@gosniias.ru.

Сидякин Сергей Владимирович — инженер, e-mail: sersid@bk.ru.

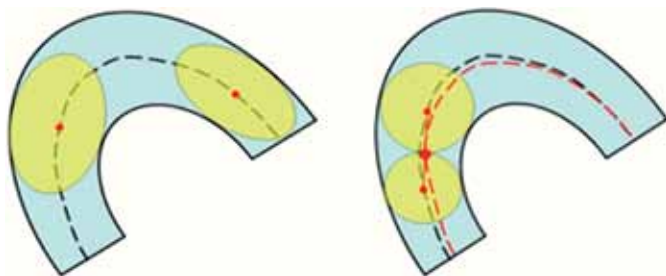


Рис. 1. Идея построения каркаса фигуры при помощи множества максимальных вписанных бициклов

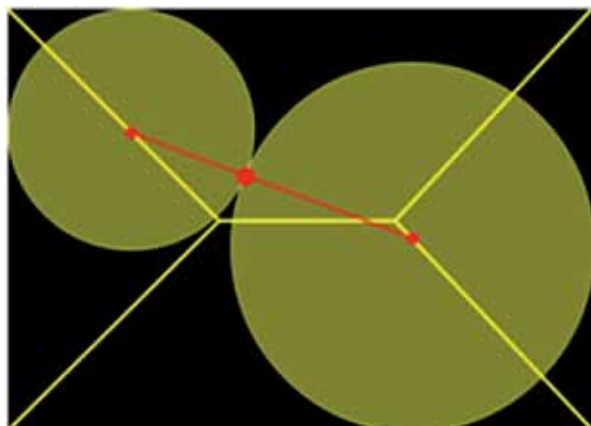


Рис. 2. «Пустой бицикл» состоит из касающихся «пустых кругов»

- перебрать все пары точек, принадлежащие скелету,  $p, q \in Sk(A)$ ;
- проверить условие  $d(p, q) = r_A(p) + r_A(q)$ , где  $r_A(p)$  — радиус пустого круга фигуры  $A$  с центром в точке  $p$ ;  $d(p, q)$  — расстояние между точками  $p$  и  $q$ ;
- если условие выполняется, в список точек каркаса заносится точка касания кругов, определяемая как точка отрезка  $pq$ , отстоящая от  $p$  на величину  $r_A(p)/(r_A(p) + r_A(q))$ .

Если бы речь шла о дискретном скелете и дискретном каркасе, то это был бы алгоритм, реализуемый за конечное время, пропорциональное квадрату числа точек скелета. Для определения непрерывного каркаса существует вычислительно эффективная версия непрерывной скелетной морфологии, предложенная Л. М. Местецким [Местецкий, 2009]. В рамках этой морфологии считается, что исследуемые фигуры ограничены замкнутыми многоугольниками с конечным числом сторон  $n$ . В этом случае скелет будет подмножеством обобщенной диаграммы Вороного, состоящим из конечного числа отрезков прямых и дуг парабол, определяемых в аналитической форме, причем за время  $O(n \ln(n))$ . При этом также аналитически находятся выражения для значений радиальной функции  $r_A(\mathbf{p})$  на этих отрезках и дугах (называемых ветвями скелета). Используя этот подход, можно реализовать следующий **алгоритм 2** построения бициклического каркаса многоугольной фигуры:

- построить непрерывный скелет  $Sk(A)$  многоугольной фигуры  $A$ ;
- перебрать все ветви и все пары ветвей скелета  $Sk(A)$  и в аналитической форме построить соответствующие им ветви (непрерывные отрезки) непрерывного бициклического каркаса.

### ЭЛЕМЕНТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ БИЦИКЛИЧЕСКОГО КАРКАСА МНОГОУГОЛЬНОЙ ФИГУРЫ

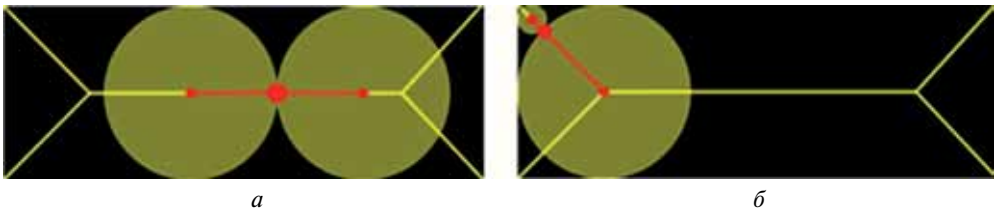
Рассмотрим сначала случай, когда центры обеих окружностей «пустого бицикла» принадлежат одной ветви скелета (рис. 3). Показанные ветви скелета имеют форму прямолинейного отрезка, и в этом случае, как видно, центры возможных «пустых бициклов» лежат на той же ветви скелета. Более того, легко показать, что отрезок прямолинейного сегмента скелета, состоящий из точек, которые не принадлежат пустым кругам с центрами в концах сегмента, целиком принадлежит бициклическому каркасу (рис. 3а). Для параболических сегментов скелета это не так.

Рассмотрим теперь случай, когда центры окружностей «пустого бицикла» принадлежат разным ветвям скелета (рис. 4). Таким случаям соответствуют *криволинейные арки каркаса, находящиеся внутри объединения пустых кругов с центрами в узлах скелета*. Рисунок 5 демонстрирует эффект слияния «тел каркаса», соответствующих близко расположенным узлам скелета, вокруг которых образуется единое «массивное тело» каркаса.

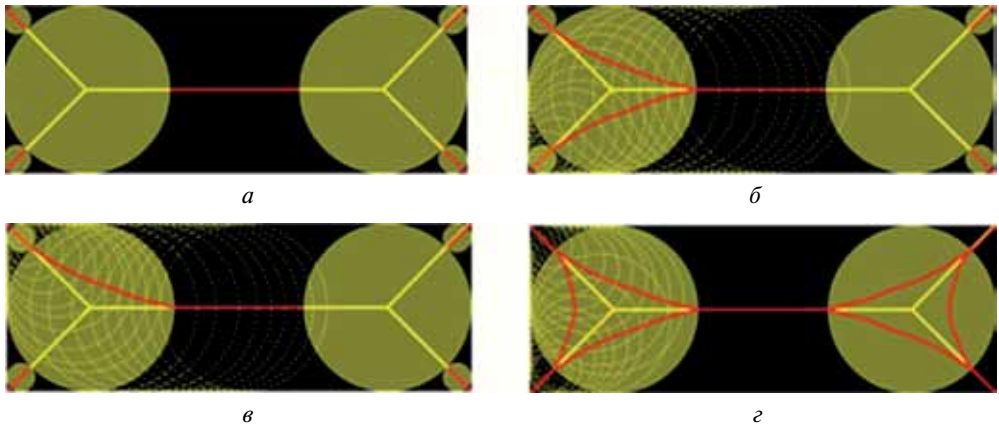
Обобщим выводы из данных примеров.

**Утверждение 1.** Бициклический каркас любой односвязной многоугольной фигуры представляет собой непрерывный (связный) планарный граф.

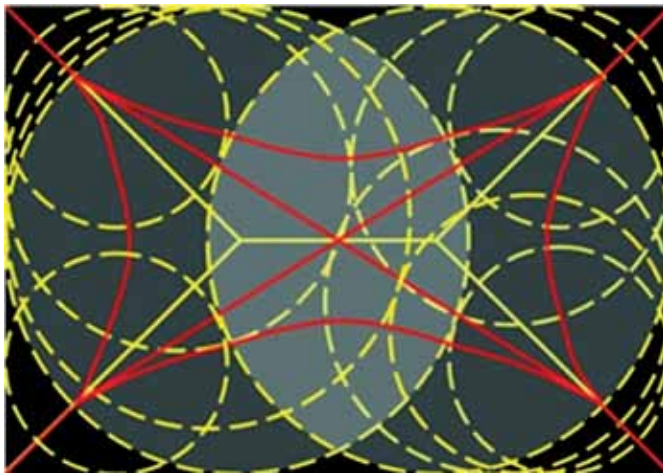
*Доказательство.* Известно, что скелет односвязной многоугольной фигуры — непрерывный (связный) планарный граф, причем радиальная функция  $r_A(p)$  изменяется непрерывно по любому пути внутри скелета (кроме конечных точек). Выберем любой максимальный путь (наибольшую непрерывную цепь сегментов, не включающую циклов, такую, чтобы она не содержалась ни в какой другой цепи) внутри скелета. Этот путь всегда начинается с конечного сегмента и заканчивается конечным сегментом, причем в начальной его точке  $r_A(p) = 0$ , а в ближайшей узловой —  $r_A(p) = r_{\max}$ . Как видно из построения (см. рис. 3), отрезок конечного сегмента скелета от конечной точки до точки, находящейся от узловой на расстоянии  $r_{\max}$ , целиком принадлежит каркасу. Последняя точка этого сегмента каркаса соответствует бициклу, состоящему из пустого круга  $B_2$  с центром в узле конечного сегмента и касающегося его меньшего пустого круга  $B_1$ , центр которого расположен ближе к концевой точке (см. рис. 3б).



**Рис. 3.** Случай, когда центры обеих окружностей «пустого бицикла» принадлежат одной ветви скелета: *а* — цилиндрический анксель; *б* — конический анксель



**Рис. 4.** Случай, когда центры обеих окружностей «пустого бицикла» принадлежат разным ветвям скелета: *а* — область, где каркас может отличаться от прямолинейных ветвей скелета (внутри пустых кругов с центрами в узлах скелета); *б* — построение арки каркаса, соединяющей две ветви скелета по бициклам с центрами на этой арке (пунктиром); *в* — построение второй арки каркаса для того же узла скелета; *г* — построение третьей арки каркаса для того же узла скелета и весь бициклический каркас для данного примера



**Рис. 5.** Случай близко расположенных узлов скелета, вокруг которых образуется единое «тело» каркаса

Рассмотрим теперь бесконечно малое смещение центра круга  $B_1$  в сторону «от концевой точки». В силу непрерывности выбранного пути и непрерывности радиальной функции вдоль него, условие касания кругов заставит круг  $B_1$  также сдвинуться в сторону «от начала пути к его концу» на бесконечно малое расстояние. Далее по индукции мы можем рассмотреть непрерывное движение центра пустого круга  $B_1$  в направлении «от начала пути к его концу». При этом, в силу непрерывности радиальной функции, центр круга  $B_2$  круга будет также непрерывно двигаться по выбранной цепи сегментов скелета, пока не упрется в конечную точку маршрута. Поскольку центры касающихся окружностей совершают непрерывное движение, точка их касания также будет двигаться непрерывно. Таким

образом, любому максимальному непрерывному маршруту внутри скелета многоугольной фигуры соответствует непрерывный маршрут внутри каркаса. Объединение всех таких непрерывных маршрутов дает весь бициклический каркас, который также будет непрерывным планарным графом.

**Утверждение 2.** Каждый узел (точка ветвления) бициклического каркаса — центр пустого бицикла, один из кругов которого имеет центр, расположенный в узле скелета многоугольной фигуры.

Дадим еще несколько определений. *Телом* бициклического каркаса назовем объединение плоских фигур, ограниченных циклическими подграфами каркаса, содержащими внутри себя узлы скелета (и не содержащие «дыры») исходной многоугольной фигуры. *Арматурой* (проволочной частью) скелета назовем ту (существенно одномерную) часть бициклического каркаса, которая не пересекается с его телом. *Коэффициентом массивности* плоской многоугольной фигуры будем называть *отношение площади тела каркаса фигуры к площади фигуры*. *Коэффициентом линейности* плоской многоугольной фигуры назовем *отношение суммарной длины арматуры ее каркаса к суммарной длине сегментов скелета*.

**Утверждение 3.** Чем ближе фигура к «жирной линии», тем ниже коэффициент ее массивности, и тем больше коэффициент линейности.

**Утверждение 4.** При ортогональных преобразованиях (сдвиг-масштаб-поворот) и симметричных отражениях плоскости коэффициенты массивности и линейности не изменяются.

Доказательства утверждений 2–4 следуют непосредственно из определений.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные результаты автоматического построения каркасов различных фигур представлены на рис. 6. Здесь синими линиями обозначены контуры исходных фигур, зелеными — непрерывный скелет, красным — опорные линии бициклического каркаса. Как видно из приведенных примеров, в целом каркас ведет себя, как и предполагалось, и позволяет судить о «протяженных» и «массивных» частях фигуры.

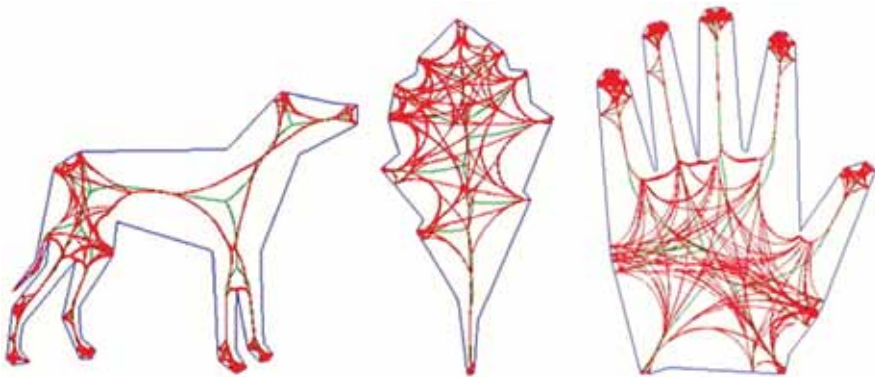


Рис. 6. Каркасы фигур (собака, лист, человеческая ладонь)

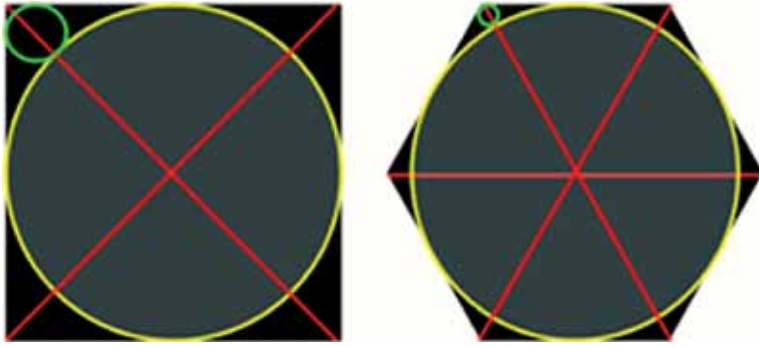


Рис. 7. Идея адаптивной регуляризации скелета на основе анализа бициклов

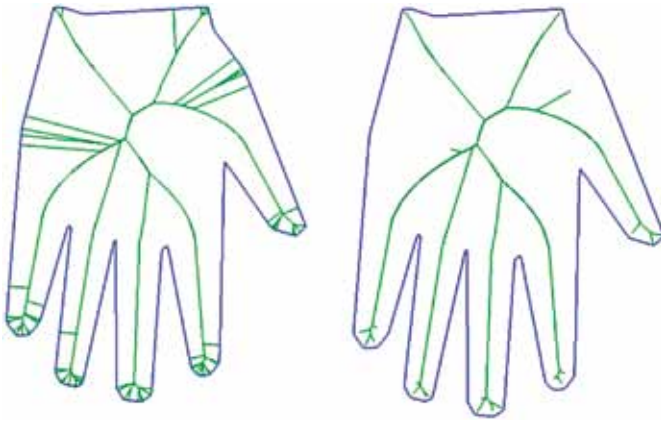


Рис. 8. Бициклическая регуляризация скелета. Слева — скелет фигуры до регуляризации; справа — скелет фигуры после регуляризации

Однако эксперименты показали явно чрезмерную чувствительность каркасов к малым искажениям формы скелета, в связи с чем, видимо, обязательным предварительным этапом, предшествующим построению каркаса, должна быть очень сильная регуляризация контуров. Было отмечено, что чем более тупой выпуклый угол порождает некоторую ветвь скелета, тем меньше будет отношение радиусов вписанного бицикла, центры окружностей которого находятся на этой ветви (рис. 7). Исходя из этого, можно определить простое правило бициклической регуляризации (стрижки) скелета: удалить все ветви скелета, для которых максимальное отношение радиусов вписанных бициклов с центрами на этой ветви меньше некоторого заданного значения. Такая бициклическая регуляризация инвариантна к сдвигу, масштабу, повороту и отражению плоскости.

На рис. 8 представлен пример бициклической регуляризации скелета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен математический формализм понятия каркаса двумерных фигур. Разработан алгоритм построения бициклического каркаса многоугольной фигуры на основе непрерывной скелетной морфологии [Местецкий, 2009].

Полученные экспериментальные результаты показали, что в целом бициклический каркас позволяет судить о «протяженных» и «массивных» частях исследуемой фигуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-08-01114-а, 11-08-01039-а).

#### ЛИТЕРАТУРА

[Местецкий, 2009] *Местецкий Л. М.* Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры. Скелеты. Циркуляры. М.: Физматлит, 2009. 277 с.

#### BICYCLICAL WIREFRAMES OF TWO-DIMENSIONAL FIGURES

Y. V. Vizilter <sup>1</sup>, S. V. Sidyakin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *State research institute of aviation systems (FGUP "GosNIIAS"), Moscow*

<sup>2</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow*

This work is about the mathematical formalization of wireframes of two-dimensional figures by using bicycles (composite figures that consist of two circles which have a one point of contact).

*Keywords:* mathematical morphology, bicycle, wireframes, skeletons, image analysis.

---

**Vizilter Yuri V.** — head of the department, dr. sci. (phys.-math.), senior researcher, e-mail: viz@gosniias.ru.

**Sidyakin Sergey V.** — engineer, e-mail: sersid@bk.ru.



## О ПРИМЕНЕНИИ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТОРА В ЗАДАЧЕ ПОИСКА СТРУКТУРНЫХ РАЗЛИЧИЙ

**Ф. А. Корнилов, Д. С. Первалов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт математики и механики Уральского отделения  
Российской академии наук (ИММ УрО РАН), Екатеринбург*

В работе рассматривается вариант регуляризации морфологического проектора, предложенного Ю. П. Пытьевым, а также его применение в задаче поиска структурных различий. Приводится описание алгоритма поиска структурных различий на основе классического и регуляризованного проекторов. Исследуются оптимальные параметры алгоритма для обоих проекторов. Производится сравнение работы алгоритма с разными проекторами на реальных снимках.

*Ключевые слова:* обработка изображений, структурные различия, морфология, регуляризация.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ цифровых космических снимков земной поверхности включает в себя множество различных задач. Важное место среди них занимает поиск структурных различий на разновременных снимках одного и того участка земной поверхности. Под структурными различиями здесь понимаются существенные изменения сцены типа появления, исчезновения или изменения формы объектов. При этом изменения освещенности и цвета объектов структурными различиями не считаются.

Входными данными для задачи предлагаются два (разновременных) полутоновых изображения. Предполагается, что они геометрически выровнены и имеют одинаковый размер в пикселах. Геометрическая выравненность означает, что каждый пиксел  $(x, y)$  соответствует одной и той же области на обоих изображениях.

Для решения задачи поиска структурных различий используется поточечный анализ. Данный подход работает непосредственно с яркостями пикселей без анализа структуры изображения, что делает его более универсальным и простым для аналитического исследования по сравнению с другими методами, использующими анализ контуров и текстурную классификацию.

Сложность решения поставленной задачи связана с наличием на снимках неструктурных различий. Например, из-за неодинаковых условий регистрации изображений объекты сцены могут существенно отличаться по яркости соответствующих им пикселей. Для устранения подобного влияния [Пытьев, Чуличков, 2010] предлагается алгоритм, основанный на методе построения оптимальной морфологической проекции. Однако этот метод очень чувствителен к зашумленности входных изображений (причем шум также считается неструктурным различием), что негативно сказывается на результате работы алгоритма, а потому рекомендуется привлекать методы регуляризации [Пытьев, 1983]. В данной работе предлагается один из вариантов такой регуляризации.

---

**Корнилов Федор Андреевич** — программист, e-mail: FAKornilov@mail.ru.

**Первалов Денис Сергеевич** — научный сотрудник, e-mail: perevalovds@gmail.com.

## ОБЩАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА ПОИСКА СТРУКТУРНЫХ РАЗЛИЧИЙ

В работе [Корнилов, Перевалов, 2011] предложены и исследованы алгоритмы, решающие такую задачу. В этих алгоритмах исходная пара изображений сканируется локальным окном заданного размера  $d$ . Для каждого положения окна строятся функции преобразования яркости  $P_f g$  и  $P_g f$ , и изображения  $f'(x) = P_f g(x)$  и  $g'(x) = P_g f(x)$ . Далее строится изображение  $R$ , яркость каждой точки которого есть максимум яркостей точек “разностных” изображений  $D_{fg}(x) = |f'(x) - g(x)|$  и  $D_{gf}(x) = |g'(x) - f(x)|$  с соответствующими координатами, и проводится его пороговая обработка. Таким образом, обработка каждого сканирующего окна дает на результирующем изображении одну точку, яркость которой 255 или 0. Далее из этих точек формируются связные области структурных различий — конечный результат.

### ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЯРКОСТИ

Для устранения неструктурных различий (вызванных влиянием условий регистрации или изменением цвета объектов) необходимо провести «выравнивание» яркостей сравниваемых изображений с сохранением их структуры. Для «выравнивания» используются специальные функции преобразования яркости — морфологический проектор и его регуляризованный вариант.

#### 1. Морфологический проектор

Морфологический проектор предложен Ю. П. Пытьевым в работах [Пытьев, 1983; Пытьев, Чуличков, 2010] и представляет собой усреднение яркости второго ( $g$ ) изображения по уровням яркости первого ( $f$ ):

$$P_f g(x) = \sum_{i=0}^{255} \left( \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \chi_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \chi_i^f(x')} \right) \chi_i^f(x),$$

где  $\chi_i^f(x) = \begin{cases} 1, & f(x) = i, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

Такой подход оптимален в случае отсутствия шума, т. е. когда каждый уровень яркости соответствует определенному объекту. Но при наличии на изображениях шума появляются «ложные» уровни яркости, которые морфологический проектор будет сохранять, что негативно сказывается на результате поиска структурных изменений.

#### 2. Регуляризованный морфологический проектор

Для устранения влияния шума требуется прибегать к методам регуляризации. Один из вариантов борьбы с шумом, основанный на морфологической сегментации исходных изображений, описан в статье [Визильтер, Горбацевич 2010]. В этой работе предлагается другой подход: регуляризация морфологического проектора, идея которой состоит в сглаживании характеристических функций уровней яркости.

**2.1.** Сначала выполняется сглаживание яркости второго изображения. Для этого для зафиксированной яркости  $i$  усреднение яркостей второго изображения будет проводиться не по множеству точек, соответствующих данному уровню яркости на первом изображении, а по всему множеству пикселей (полю зрения  $X$ ), но с определенными весами. Вес определяется формулой

$$\tilde{\chi}_i^f(x) = \exp\left[-\frac{(f(x)-i)^2}{\sigma_c^2}\right],$$

где  $\sigma_c$  — параметр сглаживания. Таким образом, в точках, соответствующих зафиксированному уровню яркости  $i$  первого изображения, вес будет равен 1 (как и для морфологического проектора), в остальных точках — некоторое число от 0 до 1 — в зависимости от того, насколько близка яркость текущей точки  $x$  к яркости  $i$  (для морфологического проектора в случае несовпадения яркостей было строго 0).

Для борьбы с граничными эффектами и получения более гладкого результата поиска структурных изменений, в весовую формулу добавляется еще один множитель, уменьшающий вес точки в зависимости от ее расстояния до центра изображения (фактически — до центра сканирующего окна):

$$\tilde{\chi}_i^f(x) = \exp\left[-\frac{(f(x)-i)^2}{\sigma_c^2}\right] \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_d^2}\right],$$

где  $x_0$  — центральный пиксел изображения,  $\sigma_d$  — параметр сглаживания.

Получается следующая формула для проектора:

$$P_f g(x) = \sum_{i=0}^{255} \left( \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \tilde{\chi}_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \tilde{\chi}_i^f(x')} \right) \chi_i^f(x).$$

Но все еще сохраняются искаженные шумом уровни яркости первого изображения.

**2.2.** Сглаживание яркостей первого изображения. Для каждого уровня яркости  $i$  (первого изображения) строится изображение  $\tilde{f}_i$ , размеры которого совпадают с размерами исходных изображений, а яркости определяются по формуле:

$$\tilde{f}_i(x) = \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \tilde{\chi}_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \tilde{\chi}_i^f(x')} \tilde{\chi}_i^f(x).$$

Таким образом, яркость пиксела  $x$  на изображении  $\tilde{f}_i$  вычисляется по сглаженному (п. 2.1.) изображению  $g$ , и берется с определенным весом. Вес будет максимален, если на изображении  $f$  яркость этого пиксела равна  $i$ , и тем меньше, чем больше разность между яркостями  $f(x)$  и  $i$ .

После этого все изображения  $\tilde{f}_i$  попиксельно складываются, и яркость каждой точки делится на ее суммарный вес. Получаем итоговую формулу регуляризованного проектора:

$$P_f g(x) = \frac{\sum_{i=0}^{255} \tilde{f}_i(x)}{\sum_{j=0}^{255} \tilde{\chi}_j^f(x)} = \sum_{i=0}^{255} \left( \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \tilde{\chi}_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \tilde{\chi}_i^f(x')} \cdot \frac{\tilde{\chi}_i^f(x)}{\sum_{j=0}^{255} \tilde{\chi}_j^f(x)} \right).$$

Таким образом, полученный проектор сохраняет преимущества морфологического проектора (устранение влияния условий регистрации), и при этом подавляет случайный шум, присутствующий на исходных изображениях.

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

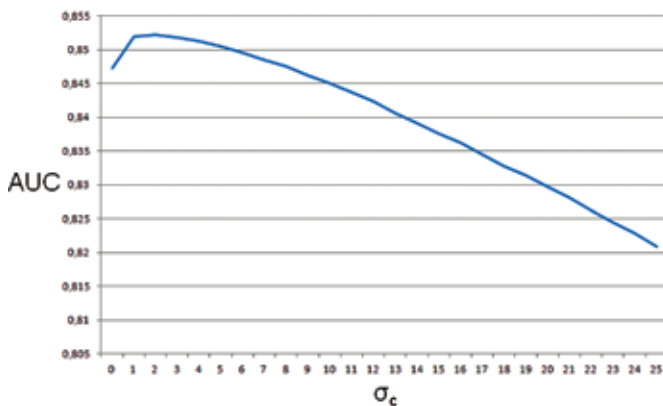
В этом разделе представлено исследование оптимальных параметров алгоритма на основе морфологического и регуляризованного морфологического проекторов, а также сравнение результатов их работы на реальных космоснимках. Для этого будет использоваться аппарат ROC-кривых. Каждая ROC-кривая строится при изменении порога (шаг 5 в схеме алгоритма) от 0 до 255. Критерием качества работы алгоритма выбрана площадь под ROC-кривой — Area Under the Curve (AUC).

### 1. Выбор оптимальных параметров

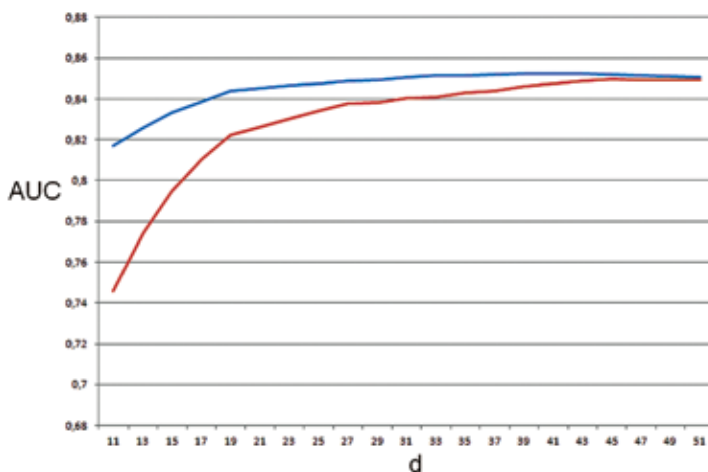
В алгоритме, основанном на морфологическом проекторе, единственный параметр — размер сканирующего окна  $d$ . Для регуляризованного проектора параметров три: размер сканирующего окна  $d$  и параметры сглаживания  $\sigma_c, \sigma_d$ .

**1.1.** Сначала исследуется параметр «яркостного» сглаживания  $\sigma_c$  регуляризованного проектора. Для этого фиксируются  $d = 41$ ,  $\sigma_d = 0$  и строится график зависимости AUC от  $\sigma_c$  (рис. 1).

Максимум, равный  $AUC_{MAX} = 0,8522$ , достигается при  $\sigma_c = 2$ . Морфологический проектор соответствует точке  $\sigma_c = 0$ , для него  $AUC = 0,8473$ .



**Рис. 1.** График зависимости качества работы алгоритма на основе регуляризованного морфологического проектора от величины «яркостного» сглаживания



**Рис. 2.** Графики зависимости качества работы алгоритма от размера сканирующего окна: синим цветом — алгоритм на основе регуляризованного морфологического проектора, красным — алгоритм на основе классического морфологического проектора

**1.2.** Затем исследуется общий для обоих проекторов параметр — размер сканирующего окна  $d$ . Фиксируется  $\sigma_c = 2$ , из общих соображений полагается  $\sigma_d = d/2$ , и строятся графики зависимости AUC от  $d$ : синим цветом — для регуляризованного морфологического проектора, красным — для классического варианта (рис. 2).

Для алгоритма на основе регуляризованного морфологического проектора  $AUC_{MAX} = 0,8522$  при  $d = 41$ . Максимум для морфологического проектора  $AUC_{MAX} = 0,8489$  при  $d = 45$ . Таким образом, оптимальные параметры алгоритма: с морфологическим проектором  $d = 45$ ; с регуляризованным морфологическим проектором  $d = 41$  ( $\sigma_d = d/2$ ),  $\sigma_c = 2$ .

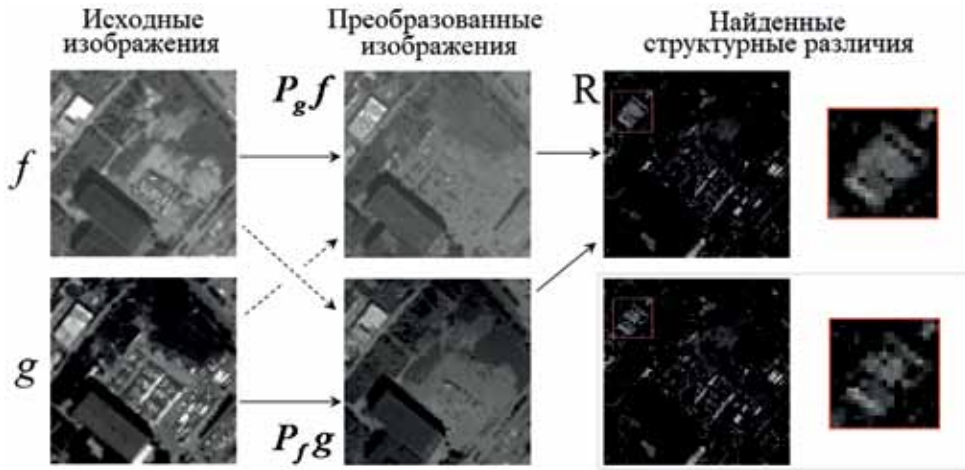
## 2. ROC-кривые

**2.1.** Для определенных в предыдущем пункте оптимальных параметров алгоритма по результирующему изображению  $R$  были построены ROC-кривые при изменении значения порога. Алгоритмы оказались практически идентичны: для морфологического проектора площадь под ROC-кривой  $AUC = 0,8473$ , для регуляризованного  $AUC = 0,8522$ .

**2.2.** Далее было проведено сравнение предлагаемого варианта регуляризации с обычным сглаживанием исходных изображений. Для этого исходные изображения сглаживались окном размера  $3 \times 3$  с коэффициентами, вычисленными

по формуле Гаусса 
$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\}$$
.

По результирующему изображению  $R$ , содержащему найденные для сглаженных изображений области структурных различий, были построены соответствующие ROC-кривые по порогу и посчитаны площади под этими ROC-кривыми: морфологический проектор (параметр  $d = 45$ ) для  $AUC = 0,8564$ ; предлагаемый метод (параметры:  $d = 41$ ,  $\sigma_c = 2$ ,  $\sigma_d = d/2$ ) —  $AUC = 0,8711$ .



**Рис. 3.** Результаты работы алгоритма: исходные изображения, преобразованные изображения и найденные области структурных различий. В красной рамке — увеличенный фрагмент

Таким образом сглаживание исходных изображений дает эффект даже лучшего качества работы алгоритма, чем регуляризация морфологического проектора. Однако такое сглаживание неизбежно размывает границы найденных объектов структурных различий, тогда как применение регуляризованного проектора сохраняет (а иногда даже улучшает) четкость границ таких объектов.

### 3. Результаты работы алгоритма

На рис. 3 представлены результаты работы для определенных выше оптимальных наборов параметров. Крайние слева — пара исходных изображений  $f$  и  $g$  городской застройки, сделанные с интервалом 4 года. В центре — те же изображения, преобразованные с помощью регуляризованного морфологического проектора. Далее взяты разность изображений  $f$  с  $P_g f$ , и  $g$  с  $P_f g$ . Можно видеть, что для этих пар изображений влияние условий регистрации устранено, и их оставшееся несоответствие — и есть структурные различия. Справа сверху — найденные алгоритмом области структурных различий (в красной рамке — увеличенный фрагмент).

Для сравнения на рис. 3. справа внизу приведены области структурных различий для тех же исходных изображений, выделенные алгоритмом на основе морфологического проектора. Оба метода нашли одни и те же области интереса, но регуляризация проектора позволила сделать эти области более однородными по яркости, без дырок и с сохранением точности границ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен вариант регуляризации морфологического проектора Ю. П. Пытьева и его применение в задаче поиска структурных различий. Положительные стороны предложенного метода (по сравнению с морфологическим проектором) в том, что он дает более «гладкий» результат — более однородные,

сглаженные области найденных структурных различий без потери точности границ областей изменений. Также предложенный метод лучше с точки зрения анализа ROC-кривых. Отрицательные стороны — значительное время работы и необходимость настройки дополнительных параметров.

Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований Президиума РАН при финансовой поддержке УрО РАН «Динамические системы и теория управления» (проект 12-П-1-1022) и «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» (проект 12-П-1-1023).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Визильтер, Горбачевич, 2010] *Визильтер Ю. В., Горбачевич В.* Морфологическая сегментация изображений земной поверхности с использованием стековых деревьев // 20-я Международ. конф. по компьютерной графике и зрению. СПб., 2010.
- [Корнилов, Первалов, 2011] *Корнилов Ф. А., Первалов Д. С.* Задача обнаружения структурных различий изображений // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений: Сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. Вып. 11. С. 37–56.
- [Пытьев, 1983] *Пытьев Ю. П.* Морфологический анализ изображений // ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 5. С. 1061–1064.
- [Пытьев, Чуличков, 2010] *Пытьев Ю. П., Чуличков А. И.* Методы морфологического анализа изображений. М.: Физматлит, 2010. 336 с.

## ABOUT THE APPLICATION OF MORPHOLOGICAL PROJECTOR IN THE TASK OF SEARCH FOR STRUCTURAL DIFFERENCES

**F. A. Kornilov, D. S. Perevalov**

*Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS, Ekaterinburg*

The variant of regularization of Yu.P.Pytev's morphological projector is proposed and its application to the problem of search for structural differences is considered. The description of the algorithm search for structural differences based on classical and regularized projectors is provided. The optimal parameters of the algorithm for both projectors are investigated. A comparison of the algorithm with different projectors on real images is presented.

*Keywords:* image processing, structural differences, morphology, regularization.

---

**Kornilov Fedor Andreevich** — programmer, e-mail: FAKornilov@mail.ru.  
**Perevalov Denis Sergeevich** — researcher, e-mail: perevalovds@gmail.com.

## ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ АППАРАТУРЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ФРАУНГЕФЕРОВЫХ ЛИНИЙ

В. Н. Остриков<sup>1</sup>, О. В. Плахотников<sup>1</sup>, А. В. Кикоть<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский филиал Открытого акционерного общества «КБ «Луч»  
(СПбФ ОАО «КБ «Луч»), Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский филиал Открытого акционерного общества «Концерн  
радиостроения «Вега» (СПбФ ОАО «Концерн «Вега»), Санкт-Петербург

Описан метод и соответствующая ему процедура оценки спектрального разрешения аппаратуры гиперспектральной съемки в естественных условиях освещения.

*Ключевые слова:* гиперспектральная съемка, спектральное разрешение, имитационное моделирование.

Одна из основных характеристик аппаратуры видовой гиперспектральной съемки (ГСС), используемой в системах технического зрения — ее спектральное разрешение (СР). Обычно производитель аппаратуры контролирует СР в лабораторных условиях с использованием специальных устройств освещения (монохроматоров). Однако в естественных условиях применения аппаратуры значения СР, часто неравномерные по диапазону [Шовенгердт, 2010], могут изменяться в зависимости от влажности и условий эксплуатации (механические вибрации, колебания температуры, осаждение частиц пыли и т.д.). Отсюда возникает задача текущей проверки параметров СР аппаратуры непосредственно в условиях проведения съемки.

В отечественной литературе отсутствует описание метода, который бы удовлетворял требованию использования естественного освещения. В зарубежных источниках имеются лишь некоторые опосредованные сведения об анализе спектрального разрешения в естественных условиях. В частности [Szekielda, 2009], описана обработка спектральных векторов в ходе съемки фитопланктона в водной среде для уточнения центров линий спектральной чувствительности аппаратуры. Изучение подобных материалов позволило разработать специальный метод оценки СР, основанный на сравнении отдельных элементов кривых, моделирующих яркость солнечного излучения со спектральными измерениями этой яркости (для попадания на линейный участок регистрации прибора используется либо естественная диафрагма (например, солнечные лучи просвечивают сквозь листву), либо нейтральный светофильтр на объективе).

Как известно [Шовенгердт, 2010], солнечные лучи проходят через атмосферу, претерпевая селективное поглощение на отдельных спектральных (фраунгоферовых) линиях. Сравнительно устойчивые участки спектра, которые с приемлемой точностью позволяют проводить искомые оценки, находятся вблизи линий 505, 665, 820 и 855 нм.

---

**Остриков Вадим Николаевич** — главный научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ostrvad@mail.ru.

**Плахотников Олег Владимирович** — начальник отдела, кандидат технических наук, e-mail: oleg-vl@yandex.ru.

**Кикоть Анатолий Валерьевич** — старший научный сотрудник, e-mail: a.v.kikot@yandex.ru.



Для определения СР часто применяется упрощенный подход [Пейсахсон, 1975], в основе которого измерение ширины отклика монохроматического импульса, поданного на вход прибора, на уровне среднего значения амплитуды интенсивности. Аналогичный метод используется в предлагаемом варианте оценки, для чего разработана соответствующая методика. Для ее реализации сначала наземным прибором проводится ГСС безоблачного участка небосвода в направлении, близком прямым солнечным лучам. При этом используются либо нейтральный светофильтр, либо выбирается участок снимка, где эти лучи ограничены естественной диафрагмой. То есть обеспечиваются такие условия, при которых регистрируемые значения интенсивности попадают на линейную характеристику чувствительности. По результатам съёмки на небольшой (десятки отсчетов) усредненной выборке формируется спектральная кривая. Эта кривая сопоставляется по форме с модельно рассчитанной совокупностью кривых на отдельных частях исследуемого спектра с различным спектральным разрешением. Совокупность определяется моделью атмосферы MODTRAN 5.2 [Berk et al., 1989]. Для оценки конкретного разрешения на том или ином участке проводится взаимное приведение измеренной и выбранной сравниваемой модельной кривой к оси абсцисс вычитанием результата сглаживания. В итоге выделяются высокочастотные тренды, пересекающие ось абсцисс близко к средней части сечения фраунгоферовых линий поглощения (сечение «на срединной линии» анализируемых участков).

Высокочастотный тренд  $x_h(k)$  определяется как разность между исходной кривой, обозначим ее как  $x(k)$ , ( $k = 1, \dots, K$ ,  $K$  — число линий) и ее сглаженным значением  $x_o(k)$ :

$$x_h(k) = x(k) - x_o(k). \tag{1}$$

В качестве фильтра, выделяющего сглаженную составляющую, используется скользящий фильтр с конечной памятью [Остриков, 1984]. Математическая модель такого фильтра описывается в виде:

$$x_o(k) = \sum_{j=1}^v a_{1j} X(k), \tag{2}$$

где:  $x_o(k)$  — сглаженная оценка исходной величины, измеренной на  $k$ -й момент времени;  $X(k) \{x(k), x(k-1), x(k-2), \dots, x(k-v-1)\}$  — текущая скользящая выборка  $v$  значений сглаживаемой кривой;  $a_{1j}$  — постоянные весовые коэффициенты, соответствующие первой строке матрицы ( $T$  — знак транспонирования)  $A$ :

$$A = (B^T B)^{-1} B^T = \begin{Bmatrix} a_{11} a_{12} \dots a_{1v} \\ a_{21} a_{22} \dots a_{2v} \\ \dots \dots \dots \\ a_{v1} a_{v2} \dots a_{vv} \end{Bmatrix}, \quad B^T = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \tau_1 & \tau_2 & \dots & \tau_v \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\tau_1^2}{2} & \frac{\tau_2^2}{2} & \dots & \frac{\tau_v^2}{2} \end{Bmatrix}, \quad \tau_i = -(i-1), \quad i = 1, \dots, v.$$

После выделения высокочастотных трендов  $x_h(k)$  для приборной и соответствующей каждой окрестности 505, 665, 820 и 855 нм модельной кривой, выделяются области — на линии  $505 \pm 10$  элементов и  $505 \pm 30$  элементов — для остальных. В пределах этих окрестностей проводится программный поиск точек пересечения экспериментальной кривой с осью абсцисс, а также точек пересечения с осью соответствующих априорно выбранных модельных кривых.

Например, применительно к модельному разрешению  $R_M = 2$  нм — для участка 505 нм. Применительно к разрешению  $R_M = 4$  нм — для участка 665 нм, к разрешению  $R_M = 8$  нм — для участка 820 нм и  $R_M = 12$  нм — для участка 855 нм. По найденным точкам пересечения оси абсцисс рассчитываются расстояния по этой оси между правым и левым пересечениями. В результате определяются отрезки сечения  $L_P$  — для аппаратурной кривой и  $L_M$  — для модельной. Оценка разрешения на каждой окрестности в линейном приближении определится как

$$R = R_M \frac{L_P}{L_M}. \quad (3)$$

На рис. 1 приведен визуальный образ кадра ГСС на одной спектральной линии, включающий направление на Солнце, а также его сегментированный образ. На основе атмосферной модели MODTRAN 5.2.0.0 [Berk et al., 1989] рассчитаны четыре спектральные кривые, соответствующие среднеширотной летней атмосфере, применительно к высоте Солнца около  $35^\circ$  для летних условий наблюдения и сельского аэрозоля. Результат сравнения наиболее близкой модельной кривой (разрешение 2 нм) и разностной кривой прибора (пунктирная) на спектральном участке 505 нм приведен на рис. 2.

Оценка спектрального разрешения на этом участке определится (3) как

$$R = R_M \frac{L_P}{L_M} = 2 \frac{7}{7} = 2 \text{ нм, где } R_M = 2 \text{ — спектральное разрешение ближайшей}$$

по форме модельной кривой. Здесь  $L_P = 7$  отсчетов — отрезок, отсекаемый приборной кривой, определяется как разность между правой точкой пересечения разностной кривой оси абсцисс в тестируемой зоне (в области 505 нанометров).  $L_M = 7$  отсчетов — отрезок, отсекаемый модельной кривой, определяется как разность между правой точкой пересечения разностной кривой оси абсцисс в этой же зоне. Аналогично были рассчитаны оценки СР на линиях 665, 820 и 855 нм.

Оценка точности используемого метода проводилась путем сопоставления полученных данных с результатами лабораторных измерений для прибора «Реагент».

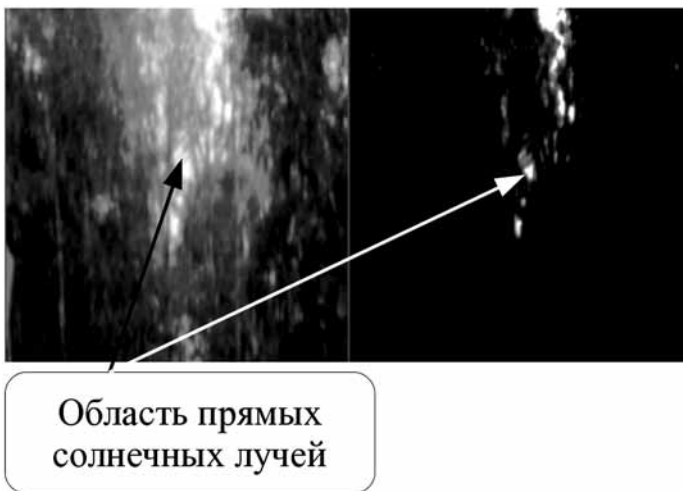


Рис. 1. Визуальный образ кадра ГСС в направлении на Солнце и его сегментированный образ

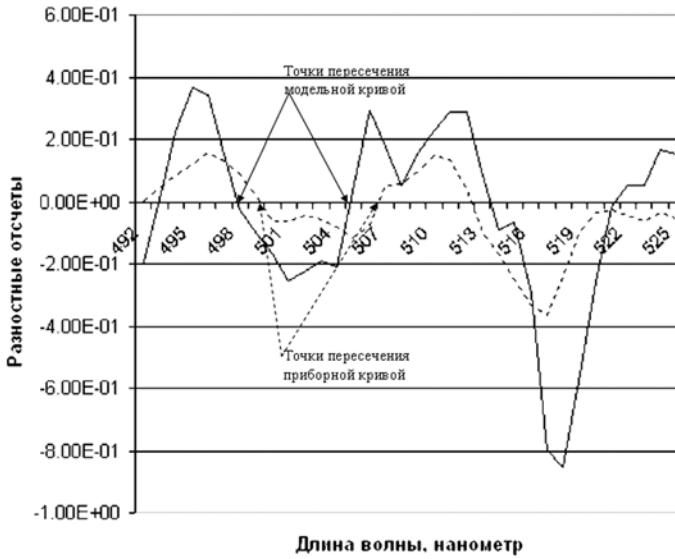


Рис. 2. Результат сравнения модельной и разностной кривых на спектральном участке 505 нм

В таблице приведены сопоставительные результаты полученных измерений, лабораторных измерений и расчетные величины изготовителя (взяты из паспорта прибора). Как показывает анализ, ошибки оценок СР предложенным методом существенно меньше ошибок лабораторных измерений, что говорит об эффективности разработанного подхода.

**Сопоставительные результаты измерений и расчетных величин**

Спектральная линия, нм	Спектральное разрешение				
	Расчетное, нм	Измеренное изготовителем, нм	Разработанный подход, нм	Ошибка измерений изготовителем, %	Ошибка измерений разработанным методом, %
505	2,0	2,2	2,0	20%	0
665	4,4	5,4	4,3	23%	1,2
820	8,2	9,3	8,3	13%	2,3
855	10,0	10,6	10,32	6%	3,2

**ЛИТЕРАТУРА**

[Остриков, 1984] Остриков В. Н. Следящий измеритель. Авторское свидетельство СССР № 1115587, 1984.  
 [Пейсахсон, 1975] Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.  
 [Шовенгердт, 2010] Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Пер. с англ. А. В. Кирюшина, А. Д. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 556 с.

- [Berk et al., 1989] *Berk A., Bernstein L., Robertson D.* MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN7: Final Report. GL-TR-0122. AFGL, Hanscom AFB. 1989. 42 p.
- [Szekielida et al., 2009] *Szekielida K. H.* et al. Interpretation of Absorption Bands in Airborne Hyperspectral Radiance Data / *Sensors*. 2009. V. 9. P. 2907–2925.

**THE SPECTRAL RESOLUTION ESTIMATION OF HYPERSPECTRAL SENSORS ON THE OBSERVATIONS OF FRAUNHOFER LINES**

**V. N. Ostrikov<sup>1</sup>, O. V. Plakhotnikov<sup>1</sup>, A. V. Kikot<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Joint-Stock Company “Luch” Branch in St. Petersburg*

<sup>2</sup> *Joint-Stock Company “Radio Engineering Corporation “Vega”  
Branch in St. Petersburg*

This paper describes the spectral resolution estimation technique of hyperspectral sensors in natural light conditions.

*Keywords:* hyperspectral data, spectral resolution, simulation models.

---

**Ostrikov Vadim Nikolaevich** — master of science, PhD, senior scientist, e-mail: ostrvad@mail.ru.  
**Plakhotnikov Oleg Vladimirovich** — head of the department, PhD, e-mail: oleg-vl@yandex.ru.  
**Kikot Anatoliy Valerevich** — research engineer, e-mail: a.v.kikot@yandex.ru.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ТОЧКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТОВОЙ СЪЕМКИ

**В. Н. Остриков<sup>1</sup>, О. В. Плахотников<sup>1</sup>, А. В. Кикоть<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский филиал Открытого акционерного общества «КБ «Луч»  
(СПбФ ОАО «КБ «Луч»), Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский филиал Открытого акционерного общества «Концерн  
радиостроения «Вега» (СПбФ ОАО «Концерн «Вега»), Санкт-Петербург

Описан метод и соответствующая ему процедура параметризованной оценки функции рассеяния точки по результатам тестовой съемки.

*Ключевые слова:* оптико-электронная съемка, пространственное разрешение, функция рассеяния точки, имитационное моделирование.

Современные тенденции достижения максимальной информативности систем оптико-электронной съемки при минимальных весовых и габаритных показателях требуют повышенной точности оценки функции рассеяния точки (ФРТ) оптико-электронных приборов (ОЭП). Это обуславливает необходимость дополнительных юстировок в процессе настройки прибора. Знание ФРТ необходимо также для повышения информативности получаемых видовых данных (например, для восстановления изображений).

Традиционная оценка качества ОЭП, построенная на основе частотно-контрастной характеристики [Smirnov et al., 1996], лишь в среднем характеризует свойства ФРТ прибора. Для получения полновесного пространственного распределения ФРТ с высокой точностью требуется тестовая съемка по специальным мишеням в реальных условиях. При этом использование других подходов, например, «слепого восстановления» [Остриков, 2012] по реальным снимкам или тестовым мишеням либо не обеспечивает необходимой точности, либо невозможно в силу теоретической некорректности поставленной задачи.

В предлагаемом методе оценка ФРТ строится на основе анализа специального тестового снимка, полученного в ходе сканирования прибором пространственной области со специальной мишенью. В качестве мишени используется прямоугольник (квадрат) либо однородно яркий на темном фоне, либо однородно темный на ярком фоне. Полученный снимок квадрата используется для вычисления его эталонного образа в качестве исходного изображения. В процессе решения задачи эталонный образ, размытый моделью с текущим значением перебираемых параметров, представляет собой синтезируемое изображение, которое подгоняется под исходное так, чтобы сумма квадратов разности между ними была минимальной и составляла значение, близкое к уровню шума на тестовом снимке. Для расчета ФРТ, характеризующей степень «размазанности» на заданном тестовом образе, на основе известных положений оптической теории линейных систем строится сквозная модель размытия изображения каналом передачи.

В общем случае в процессе переноса сигнала от пространства предметов к пространству изображений видеосигнал претерпевает амплитудные и фазовые

---

**Остриков Вадим Николаевич** — главный научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ostrvad@mail.ru.

**Плахотников Олег Владимирович** — начальник отдела, кандидат технических наук, e-mail: oleg-vl@yandex.ru.

**Кикоть Анатолий Валерьевич** — старший научный сотрудник, e-mail: a.v.kikot@yandex.ru.

искажения, а также обычно отдельно выделяемые искажения, вызываемые аддитивным (практически всегда выполняемое предположение) шумом. Шум сказывается лишь на конечном этапе формирования снимка, когда амплитудно-фазовые искажения канала уже проявили свое влияние.

Выражение для формирования видеосигнала в канале можно записать в общепринятом виде:

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)h(\xi, \eta, x, y) dx dy + n(\xi, \eta), \quad (1)$$

где  $f(x, y)$  — входное неискаженное изображение (эталонный образ);  $g(\xi, \eta)$  — выходное изображение;  $h(\xi, \eta, x, y)$  — ФРТ;  $n(\xi, \eta)$  — аддитивный случайный шум.

Общий вид функции  $h(\xi, \eta, x, y)$  предполагает пространственную зависимость размытия сформированного изображения. При выполнении условия изопланарности локального участка изображения выражение (1) можно записать в виде:

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)h(\xi - x, \eta - y) dx dy + n(\xi, \eta). \quad (2)$$

Тогда амплитудно-фазовые искажения входного изображения  $f(x, y)$  можно записать в частотной области:

$$G(\omega_x, \omega_y) = F(\omega_x, \omega_y)H(\omega_x, \omega_y) + N(\omega_x, \omega_y), \quad (3)$$

где  $G, F, H, N$  — соответствующие пространственные спектры двумерного преобразования Фурье функций  $g(x, y), f(x, y), h(x, y), n(\xi, \eta)$ .

Амплитудно-фазовые искажения, как это следует из выражения (3), вызваны ФРТ, свойства которой определяются: наличием аберраций в оптической системе, формирующей изображение; дифракцией принимаемого пучка на апертуре; амплитудно-фазовыми искажениями на трассе переноса оптического сигнала.

Для задания оптической передаточной функции канала формирования изображения требуется знание амплитудного распределения на входном зрачке. В большинстве случаев это распределение либо априорно известно, либо с достаточной степенью точности его можно принять постоянным (равным единице). Тогда получение оценки реально присутствующих фазовых возмущений позволяет однозначно восстановить оптическую передаточную функцию канала или связанную с ней преобразованием Фурье функцию рассеяния точки  $h$  [Гудмен, 1998]:

$$h = [\Phi_2(P)]^2, \quad (4)$$

где  $\Phi_2(\cdot)$  — прямое двумерное преобразование Фурье;  $P$  — комплексная функция зрачка, для которой

$$P = [p_{st}] = \begin{cases} 0, & \rho_{st} \leq \varepsilon \\ p(\rho_{st}, \theta_{st}), & \varepsilon < \rho_{st} \leq 1 \end{cases}, \quad (5)$$

где:  $\rho_{st} = 2\sqrt{s^2 + t^2}/\rho_m$ ;  $\theta_{st} = \arctg(t/s)$  — полярные радиус и угловая координата точки, соответствующие прямоугольным координатам  $s, t$ ;  $\rho_m$  — максимальное значение радиуса апертуры на матрице ( $N \times N$ ),  $s, t = 0, 1, \dots, N$ ;  $\varepsilon$  — коэффициент экранирования объектива.

Таким образом, можно считать амплитудное пропускание канала  $A(\rho_{st}, \theta_{st})$  априорно заданным, а искажения изображения следствием влияния волновых аберраций (возмущений)  $w(\rho_{st}, \theta_{st})$

$$p(\rho_{st}, \theta_{st}) = A(\rho_{st}, \theta_{st}) \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} w(\rho_{st}, \theta_{st}) \right]. \quad (6)$$

Разложим фазовый член возмущений в ряд по полиномам Цернике

$$w(\rho_{st}, \theta_{st}) = \sum_{j=0}^{n-1} q_j z_j(\rho_{st}, \theta_{st}), \quad (7)$$

где  $z_j(\rho_{st}, \theta_{st})$  —  $j$ -й полином. Первые десять полиномов Цернике имеют вид [Воронцов, Шмальгаузен, 1985]:  $z_0 = 1$ ;

$$\left. \begin{aligned} z_1(\rho_{st}, \theta_{st}) &= 2\rho_{st} \cos(\theta_{st}); & z_2(\rho_{st}, \theta_{st}) &= 2\rho_{st} \sin(\theta_{st}); \\ z_3(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{3}(2\rho_{st}^2 - 1); & z_4(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{6} \cdot \rho_{st}^2 \sin(2\theta_{st}); \\ z_5(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{6} \cdot \rho_{st}^2 \cos(2\theta_{st}); & z_6(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{8}(3\rho_{st}^3 - 2\rho_{st}) \sin(\theta_{st}); \\ z_7(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{8}(3\rho_{st}^3 - 2\rho_{st}) \cos(\theta_{st}); & z_8(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{8} \cdot \rho_{st}^3 \sin(3\theta_{st}); \\ z_9(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{8} \cdot \rho_{st}^3 \cos(3\theta_{st}); & z_{10}(\rho_{st}, \theta_{st}) &= \sqrt{5}(6\rho_{st}^4 - 6\rho_{st} + 1). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Обозначим вектор коэффициентов разложения  $q = [q_j], j = 0, 1, \dots, n - 1$ . Тогда линейную модель формирования пробного (размазанного текущей моделью ФРТ) изображения  $G = [g_{st}]$  в предположении его изопланарности в пределах тестового участка можно записать в виде:

$$G = [g_{st}] = \Phi_2^{-1} \{ \Phi_2 [f] \Phi_2 [h] \}, \quad (9)$$

где  $f = [f_{st}]$  — эталонный образ объекта, то есть не размытый абберрационной и дифракционной функцией его энергетический портрет ( $N \times N$ -матрица);  $\Phi_2^{-1}(\cdot)$  — обратное двумерное преобразование Фурье.

В операторной форме представления абберрационную модель размытия (3), в предположении отсутствия шума, можно записать в виде:

$$g = H(q)f, \quad (10)$$

где  $f, g$  — входное и выходное изображения соответственно.

Тогда поиск ФРТ, соответствующей решению задачи, состоит в последовательном поиске оператора  $H(q^0)$ , для которого выполняется условие:

$$q^0 = \arg \min_q \left\{ \frac{1}{N * N} \sum_{\xi} \sum_{\eta} [g(\xi, \eta) - \tilde{g}(\xi, \eta)]^2 \right\}, \quad (11)$$

где  $\tilde{g}$  — полученное прибором (исходное) изображение тестового образа;  $g$  — рассчитанное в соответствии с (10) размытое текущей величиной ФРТ изображение энергетического портрета тестового изображения, обусловленное оператором  $H(q)$ .

Из изложенного подхода следует, что для расчета ФРТ (или оптической передаточной функции) по полученному прибором тестовому фрагменту исходного снимка строится схема вычисления последовательных пробных образов с перебором (из заранее заданного диапазона) возможных значений  $q_k$  (в данном случае — не более десяти) значимых коэффициентов ее фазового разложения по полиномам Цернике. Последовательное уточнение каждого коэффициента можно проводить независимо в силу практически полной линейной независимости базиса разложения искомого решения по полиномам Цернике [Остриков, Плахотников,

2006]. Критерием останова станет достижение условия (11). В результате формируется оценка вектора

$$q = q^* = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, \dots\}. \quad (12)$$

Выбранное максимальное число используемых членов разложения определяется достаточно высокой точностью выполнения условия (11), которое в идеальном варианте обеспечивает статистическое равенство вычисляемой взвешенной суммы квадратов невязок СКО и исходного шума на тестовом снимке.

Предложенный метод предопределяет следующую последовательность операций по формированию эталонного фрагмента: расчет средних яркостей по объекту и фону исходной зоны, вычисление функции рассеяния линии — численное дифференцирование функций рассеяния края, поиск максимума этих производных (рис. 1), восстановление границ простого объекта по максимумам вычисленных производных (рис. 2). Затем следует в пределах вычисленных границ заполнение объекта (квадрата) постоянным значением яркости, соответствующим средней яркости по объекту исходной зоны. Фоновая часть заполняется значением яркости, соответствующей среднему значению периферийной области снимка.

На рис. 3 приведено сравнение меридионального и сагиттального сечений оценки ФРТ (пунктирная линия) с истинным значением (сплошная) для большого уровня фазовых искажений волнового фронта применительно к расчету на основе разработанного метода. При этом рассчитанные значения ширины сечений

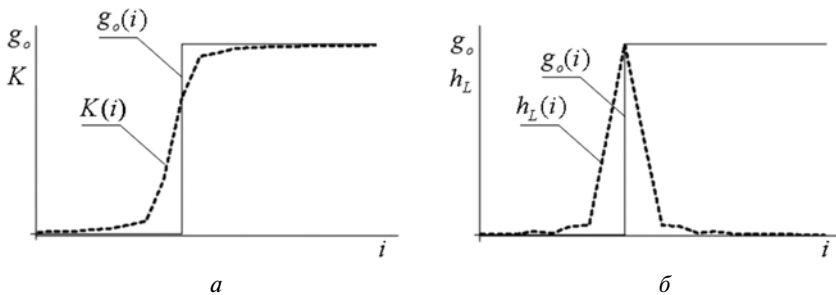


Рис. 1. Пример формирования функции рассеяния линии (ФРЛ)  $h_L(i)$  (б) в точке перехода от светлого поля к темному на одном из сечений тестового участка (а);  $K(i)$  — реальное сечение участка;  $g_0(i)$  — искомое положение края

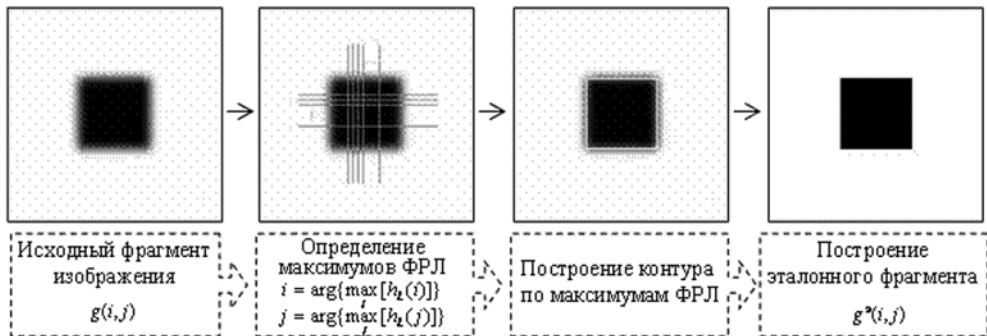
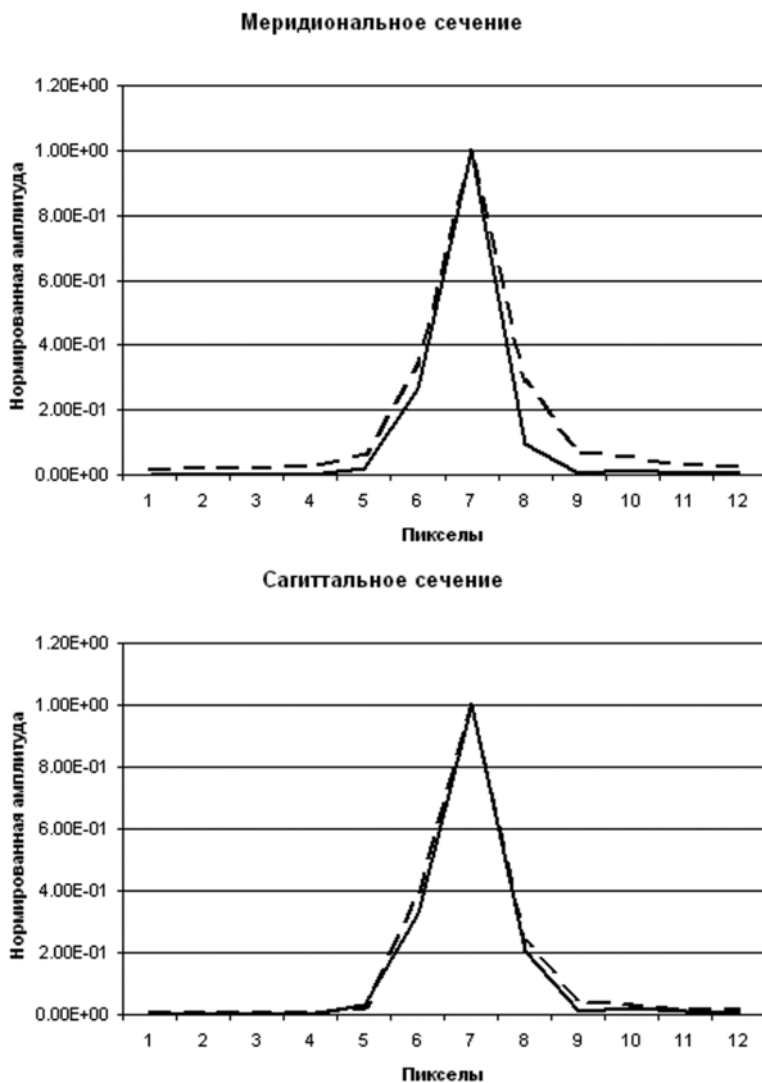


Рис. 2. Пример реализации последовательности преобразований в ходе получения эталона по исходному фрагменту на модели



по срединной амплитуде соответствуют величинам: для меридионального истинного сечения — 1,24 пиксела; для сагиттального истинного сечения — 1,38; для меридионального сечения найденной оценки — 1,46; для сагиттального сечения найденной оценки — 1,46. Относительная ошибка оценки для меридионального сечения — 17,8 %, для сагиттального сечения — 6 %.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет восстановить, при возможности определения эталонного образа снимаемого объекта, значения ФРТ применительно к искажениям размытия в канале, соответствующим обычным фазовым aberrациям [Сокольский, 1989] с точностью, обусловленной наличием случайного шума на тестовом изображении.



**Рис. 3.** Сравнение меридионального и сагиттального сечений оценки ФРТ (пунктирная линия) с истинным значением (сплошная) для большого уровня фазовых искажений волнового фронта применительно к расчету на основе разработанного метода

ЛИТЕРАТУРА

- [Воронцов, Шмальгаузен, 1985] *Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
- [Гудмен, 1998] *Гудмен Дж.* Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 527 с.
- [Остриков, 2012] *Остриков В. Н.* Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления // Сб. научно-техн. ст. «Техническое зрение в системах управления 2011» / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 16–20.
- [Остриков, Плахотников, 2006] *Остриков В. Н., Плахотников О. В.* Идентификация функции рассеяния точки канала наблюдения по калибрующему изображению посредством метода наименьших квадратов // Оптич. журн. 2006. Т. 73. № 2. С. 26–30.
- [Сокольский, 1989] *Сокольский М. Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 181 с.
- [Smirnov et al., 1996] *Smirnov M. V., Korolev A. N., Sivjakov I. N., Zvezdin D. I.* Method and software of automatic resolution evaluating of optic-electronic telescopic land remote sensing system // AeroSense'96 Symp. Visual Information Processing V: Proc. SPIE. 1996. V. 2753.

**THE COMPARATIVE EVALUATION OF THE POINT SPREAD  
FUNCTION BASED ON THE RESULTS OF A TEST SHOOT**

**V. N. Ostrikov<sup>1</sup>, O. V. Plakhotnikov<sup>1</sup>, A. V. Kikot<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Joint-Stock Company “Luch” Branch in St. Petersburg*

<sup>2</sup> *Joint-Stock Company “Radio Engineering Corporation “Vega”  
Branch in St. Petersburg*

This paper describes the parameterized estimation technique of the point spread function on the results of a test shoot.

*Keywords:* optoelectronic shooting, spatial resolution, point spread function, simulation models.

---

**Ostrikov Vadim Nikolaevich** — master of science, PhD, senior scientist, e-mail: ostrivad@mail.ru.  
**Plakhotnikov Oleg Vladimirovich** — head of the department, PhD, e-mail: oleg-vl@yandex.ru.  
**Kikot Anatolij Valerevich** — research engineer, e-mail: a.v.kikot@yandex.ru.

## КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА ЛИНЕЕК ФОТОДАТЧИКОВ НА ВИДЕОСИГНАЛ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ТИПА

**В. П. Андреев**

*Международная лаборатория «Сенсорика» (МЛ «Сенсорика»), Москва*

Рассматривается вопрос улучшения технических и эксплуатационных характеристик специализированных систем технического зрения (СТЗ), в которых используются линейные многоэлементные приёмники оптического излучения ИК-диапазона. Предложен адаптивный метод коррекции видеосигнала, предназначенный для компенсации влияния геометрического шума. Метод позволяет исключить из оптико-механической системы сканирования источники эталонного излучения. Приведены варианты функциональных схем соответствующих спецпроцессоров.

*Ключевые слова:* система технического зрения, приёмники оптического излучения, коррекция видеосигнала, геометрический шум.

### ПРОБЛЕМА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА

К специализированным системам технического зрения относятся СТЗ, использующие в качестве датчика видеосигнала тепловизоры, работающие в дальнем ИК-диапазоне (2,5...14 мкм). Подавляющее большинство современной тепловизионной аппаратуры создаётся на базе многоэлементных твёрдотельных фотоприёмников, которые изготавливаются на основе полупроводникового соединения, получившего в нашей стране аббревиатуру КРТ (GdHgTe — твердый раствор теллуридов кадмия и ртути). Для получения качественных тепловых изображений большого формата обычно используют линейку таких фотодатчиков, которая устанавливается в прецизионную оптико-механическую систему сканирования. В таких системах видеосигнал формируется в процессе последовательной коммутации фотодатчиков, которые, как единое целое, перемещаются в направлении, перпендикулярном расположению фотодатчиков на линейке. В процессе сканирования каждый из  $N$  фотодатчиков формирует электрический сигнал  $U_i(x)$ , величина которого пропорциональна потоку излучения  $E_i(x)$ , попадающему на фотодатчик через объектив. В результате каждый фотодатчик формирует одну строку изображения.

В большинстве случаев функция преобразования излучения в электрический сигнал фотодатчика может быть описана линейной моделью:

$$U = S_u \Phi_T + V, \quad (1)$$

где:  $S_u$  — эффективная вольт-ваттная чувствительность фотодатчика ( $0 < S_u \leq 1$ );  $V$  — эффективное темновое напряжение фотодатчика ( $V \geq 0$ );  $\Phi_T$  — поток ИК-излучения при температуре сцены  $T$  ( $\Phi_T \geq 0$ ).

---

**Андреев Виктор Павлович** — заместитель директора по научным вопросам, доктор технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: andreevvipa@yandex.ru.

*Геометрическим шумом* принято называть неравномерность видеосигнала многоэлементного приемника излучения, вызванную несоответствием выходного сигнала  $U$  потоку излучения  $\Phi_T$ , которое возникает вследствие разброса значений чувствительности  $\{S_u\}$  и значений темновой составляющей  $\{V\}$  фотодатчиков.

Геометрический шум у лучших на сегодняшний день образцов многоэлементных фотоприемников диапазона 8...10 мкм намного превосходит значения, необходимые для получения качественных тепловых изображений. Так, например, у фотодатчиков на основе КРТ диапазона 7,7...10 мкм разброс по чувствительности составляет 5 % (SOFRADIR — Франция, DRS Infrared Technologies — США), у микроболометрических — неоднородность не превышает 4 % (Raytheo), 3 % (Sofradir), 5 % (LETI — Франция).

В процессе эксплуатации линейки фотодатчиков под воздействием целого ряда факторов происходит изменение параметров  $\{S_i\}$  и  $\{V_i\}$ . Однако время, в течение которого чувствительность фотодатчика изменится на величину, соизмеримую с его пороговой чувствительностью, много больше времени сканирования одного кадра изображения. Тогда процесс коррекции разделяется естественным образом на две части: одна — это собственно компенсация неравномерности видеосигнала, которую следует выполнять с частотой опроса фотодатчиков линейки, другая — вычисление корректирующих коэффициентов, которое может выполняться с более медленной скоростью.

## МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ВИДЕОСИГНАЛА

Хорошо известен эталонный способ, который заключается в предварительной засветке фотодатчиков одним или двумя источниками эталонного излучения различной интенсивности. Значения видеосигнала от каждого фотодатчика в момент прохождения сканирующей линейки над источниками эталонного излучения запоминаются, и по этим отсчетам вычисляются корректирующие коэффициенты. Недостаток такого способа — низкая точность компенсации вследствие отсутствия учета флуктуационных шумов фотодатчиков и источников эталонного излучения. Изменение параметров фотодатчиков во времени требует частого обращения к эталонированию. При этом организация оперативной и достаточно равномерной эталонной засветки в прецизионной оптико-механической системе тепловизионного прибора (особенно с несколькими эталонами) — довольно сложная и дорогостоящая техническая задача.

В современных тепловизорах для борьбы с геометрическим шумом широко используется метод временной задержки и накопления (ВЗН) — усреднение значений сигналов, считанных от элементарного фрагмента оптического изображения различными фотодатчиками. Метод основан на использовании специальных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) и обладает невысокой эффективностью.

Известен безэталонный способ, основанный на статистических свойствах изображения, в котором используется упрощенная модель фотодатчика:

$$U_i(x) = S_i E_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где  $i$  — номер строки.

Делается предположение, что изображение есть случайная функция яркости, обладающая свойством эргодичности. Это позволяет считать любую реализацию типичной. Двумерная функция яркости  $E(x, y)$  представляется в виде  $N$  одномер-

ных реализаций случайной функции  $E_i(x)$ . Тогда из свойства эргодичности вытекает, что с вероятностью, сколь угодно близкой к единице:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_2 = \dots = \bar{E}_N = \bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{E}_i, \quad (3)$$

где  $\bar{E}_i = \int_{[0..X]} E_i(x) dx$  при  $X \rightarrow \infty$ .

Условие (3) используют для формирования корректирующего сигнала — за эталон принимается значение  $\bar{E}$ .

Однако использовать свойство эргодичности можно лишь в случае, когда «отрезки сообщений» достаточно длинные, т.е. когда это совокупность нескольких тысяч или миллионов кадров. При ограничении длины реализаций нарушается свойство эргодичности и повышается вероятность события, когда условие (3) не будет соблюдаться. Это приведет к ошибкам в вычислении корректирующих коэффициентов и, следовательно, к искажениям. Они обычно проявляются в виде регулярных полос различной яркости на результирующем изображении, что значительно затрудняет анализ изображений человеком-оператором.

### МЕТОД АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ВИДЕОСИГНАЛА

Для вычисления параметров коррекции видеосигнала предлагается использовать модель изображения, основанную на сильных корреляционных связях смежных строк изображения [Лебедев, Цуккерман, 1965]. Это позволит повысить точность вычисления корректирующих коэффициентов при малой длине реализаций, поскольку в модели изображения не используется свойство эргодичности. Метод не требует какого-либо усложнения оптико-механической системы. Такая модель изображения может быть описана [Андреев, 2011].

Изображение можно рассматривать как  $N$  реализаций (строк) конечной длины ( $X = M$ ) случайной функции яркости  $E_i(x)$ , которые обладают следующими тремя свойствами:

- вероятность того, что в пределах одного кадра дисперсии функции яркости  $D(E_i)$  и  $D(E_{i+1})$  смежных строк одинаковы (событие  $A_{i,i+1}$ ), много больше вероятности того, что они различны (событие  $B_{i,i+1}$ ):  $P(A_{i,i+1}) \gg P(B_{i,i+1})$ ;
- вероятность того, что в пределах одного кадра средние значения функции яркости  $\bar{E}_i$  и  $\bar{E}_{i+1}$  смежных строк одинаковы (событие  $F_{i,i+1}$ ), много больше вероятности того, что они различны (событие  $H_{i,i+1}$ ):  $P(F_{i,i+1}) \gg P(H_{i,i+1})$ ;
- события  $A_{i,i+1}$  и  $B_{i,i+1}$ , а также  $F_{i,i+1}$  и  $H_{i,i+1}$  образуют, соответственно, полную группу событий:  $P(A_{i,i+1}) + P(B_{i,i+1}) = 1$  и  $P(F_{i,i+1}) + P(H_{i,i+1}) = 1$ .

Используя данные свойства, можно вычислить относительные значения  $\{S_i^*\}$  и  $\{V_i^*\}$  из итерационных формул:

$$S_i^* = \begin{cases} S_k^*, & i = k, \\ S_{i+1}^* G_{i,i+1}, & i > k, \\ S_{i-1}^* / G_{i,i-1}, & i < k, \end{cases} \quad V_i^* = \begin{cases} V_k^*, & i = k, \\ Q_{i,i+1} + V_{i+1}^* G_{i,i+1}, & i > k, \\ (V_{i-1}^* - Q_{i-1,i}) / G_{i,i-1}, & i < k, \end{cases} \quad (4)$$

где  $G_{i,i+1} = \sqrt{D(U_i)/D(U_{i+1})}$ ,  $Q_{i,i+1} = \bar{U}_i - G_{i,i+1}\bar{U}_{i+1}$  для каждого кадра;  $D$  — дисперсия видеосигнала;  $k$  — номер опорного фотодатчика.

Повысить точность вычисления переходных коэффициентов  $G_{i,i+1}^{(p)}$  и  $Q_{i,i+1}^{(p)}$  можно простым усреднением по  $p$  значений этих параметров, полученных для последовательности из  $P$  кадров ( $P \geq 3$ ). Очевидно, что с увеличением числа разносюжетных кадров возрастает точность вычисления данных параметров.

Введем в модель изображения еще одно свойство, основанное на сюжетных различиях в кадрах:

- события  $A_{i,i+1}$  и  $B_{i,i+1}$ , а также  $F_{i,i+1}$  и  $H_{i,i+1}$  для любой из  $N-1$  пар смежных строк в разных ( $m$  и  $n$ ) кадрах независимы:

$$P(A_{i,i+1}^n, B_{i,i+1}^m) = P(A_{i,i+1}^n) \cdot P(B_{i,i+1}^m) \quad \text{и} \quad P(F_{i,i+1}^n, H_{i,i+1}^m) = P(F_{i,i+1}^n) \cdot P(H_{i,i+1}^m).$$

Так как  $\{S_i\}$  имеют случайный характер, то и  $\{G_{i,i+1}^{(p)}\}$  в пределах одного  $p$ -го кадра будут иметь случайные значения. Однако для каждой пары соответственных смежных фотодатчиков значение  $G_{i,i+1}^{(p)}$  будет повторяться во всех  $(J - J'_{i,i+1}) = I_{i,i+1}$  кадрах. Тогда для каждой пары смежных фотодатчиков переходные коэффициенты, вычисленные по разным кадрам, в большинстве случаев будут иметь близкие (типовые) значения, и лишь для отдельных  $m$  кадров будут от них отличаться. Используя терминологию теории ошибок, назовем **аномальными** значения  $\{G_{i,i+1}^{(m)}\}$ . Аналогичный результат имеет место и для  $\{Q_{i,i+1}^{(p)}\}$ . Повысить точность вычисления переходных коэффициентов можно посредством отбрасывания аномальных значений. Для этого используется критерий Шовене или методы кластерного анализа.

### СПЕЦПРОЦЕССОР ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ВИДЕОСИГНАЛА

На основе предложенного метода были разработаны варианты спецпроцессоров, способных со скоростью сканирования выполнять компенсацию разброса параметров линейки фотодатчиков (рис. 1).

Решение на рис. 1а, требует использования многоразрядного скоростного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) из-за больших темновых токов фотодатчиков ( $S_i E_i(x) \ll V_i$ ), что, в свою очередь, потребует соответственного увеличения разрядности ОЗУ и регистров, также необходим более сложный и более дорогой микропроцессор. В решении на рис. 1б за счет обратной связи аддитивная составляющая вычитается из входного сигнала до АЦП. Следует учитывать, что такое решение связано с усложнением алгоритма работы микропроцессора.

Для исключения высокочастотных шумов коммутации, предлагается изменить схемотехническое решение ФПУ (рис. 2). Вводится дополнительный коммутатор аналоговых сигналов (**I**), на который синхронно подаются значения аддитивного корректирующего сигнала. Вводятся  $N$  элементов хранения аналогового сигнала (ЭП), и на каждый канал фотодатчика устанавливается аналоговый сумматор (СМ). Тогда между сменой кадров коммутатор передает значения корректирующих сигналов на соответствующие ЭП, которые сохраняют эти значения неизменными во время активной части сканирования.

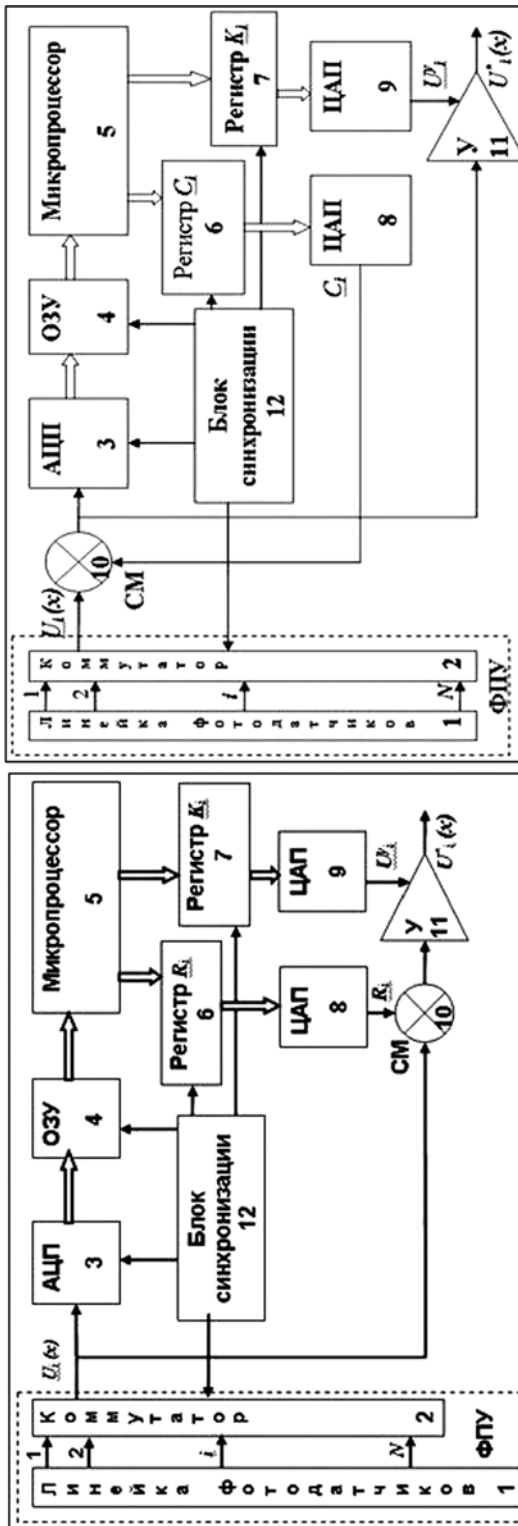


Рис. 1. Функциональные схемы субпроцессоров

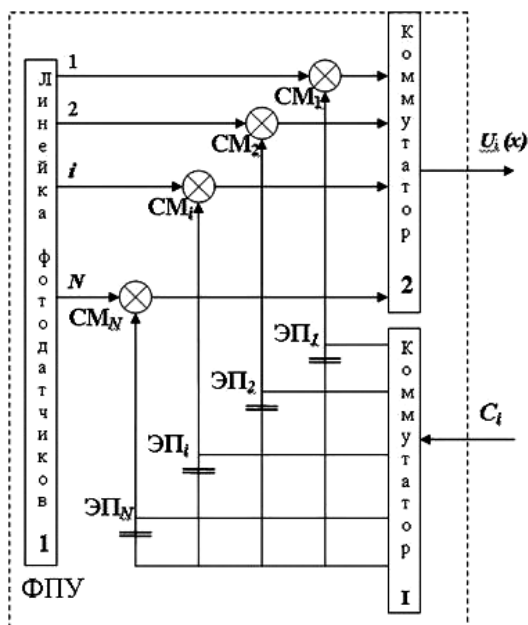


Рис. 2. Вариант ФПУ

Сумматор 10 из схемы исключается, весь тракт компенсации аддитивной составляющей оказывается низкочастотным, что существенно повышает помехоустойчивость устройства.

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Было выполнено компьютерное моделирование спецпроцессора (см. рис. 1а). В качестве исходных использовались 16 разносюжетных цифровых черно-белых изображений формата  $512 \times 512$  пикселей при 256 уровнях квантования видеосигнала. Параметры линейки были сгенерированы генератором псевдослучайных чисел с равномерным распределением с пределами разброса параметров  $0,1 < S_i \leq 1,0$  и  $0 \leq V_i \leq 230$ . Было реализовано три метода вычисления корректирующих коэффициентов по нескольким кадрам: накопления статистики (рис. 3), усреднения переходных коэффициентов (рис. 4) и усреднения с отбрасыванием аномальных значений (рис. 5).

Все методы испытывались на одинаковых последовательностях изображений. В качестве критерия использовалась зависимость количества «ложных» контуров  $n$ , появившихся на скорректированном изображении ровного фона, от значения модуля лапласиана (величина контурного сигнала), попадающего в заданный диапазон, поскольку воздействие геометрического шума приводит к появлению на таком изображении контуров подобного типа. Выбор данного критерия определяется его согласованностью со свойствами зрения человека.

Метод накопления статистики показал наилучшие результаты даже при небольшом количестве исходных изображений. Причем при использовании семи и более входных изображений наблюдались практически одинаковые показатели эффективности.



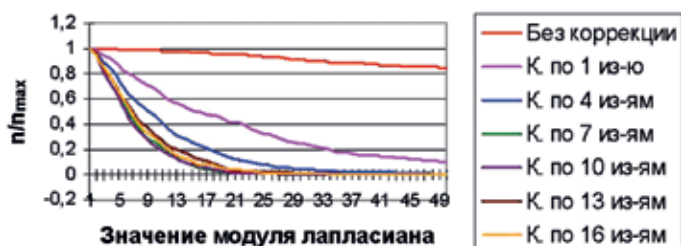


Рис. 3. Коррекция методом накопления статистики

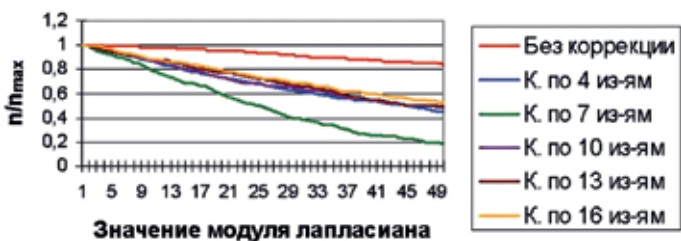


Рис. 4. Коррекция методом усреднения переходных коэффициентов

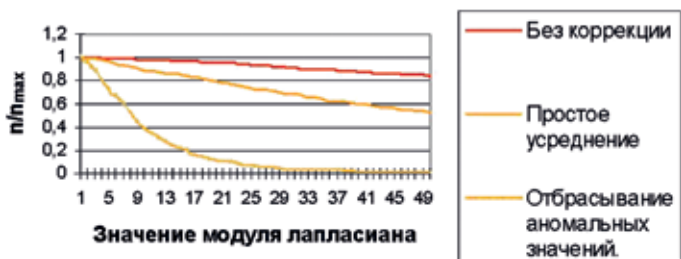


Рис. 5. Коррекция по 16 изображениям методом усреднения с отбрасыванием аномальных значений

Можно предположить, что метод с отбрасыванием аномальных значений при той же эффективности будет более устойчив к качеству входных изображений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность методов цифровой обработки изображений с целью фильтрации различного рода шумов существенно зависит от сложности реализации этих методов. Для задачи фильтрации геометрического шума цифровая обработка видеосигналов оказывается на сегодняшний день единственным решением, поскольку современные технологии производства многоэлементных фотодатчиков ИК-диапазона на КРТ не позволяют получить требуемые технические параметры. Особенность предлагаемых методов заключается в их простой технической реализации (без встраивания в оптическую систему эталонных источников излучения) и организации цифровой обработки видеосигналов с помощью специализированных цифровых устройств, работающих в реальном масштабе времени.

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 10-07-00612а).

### ЛИТЕРАТУРА

- [Андреев, 2011] *Андреев В. П.* Адаптивный метод коррекции видеосигнала для систем технического зрения со сканирующей линейкой фотодатчиков // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9. № 9. С. 77–84.
- [Лебедев, Цуккерман, 1965] *Лебедев Д. С., Цуккерман И. И.* Телевидение и теория информации. М.-Л.: Энергия. 1965. 218 с.

### VIDEO SIGNAL CORRECTION FOR SCANNING PHOTOCELL ARRAY FOR THE COMPUTER VISION SYSTEMS

**V. P. Andreev**

*International Laboratory “SENSORIKA” (IL “SENSORIKA”), Moscow*

The method provides compensation of the influence of parameter spread of sensitive elements of the photo sensor array on the output signal. The method is based on statistical image properties and does not require embedding into the system of optical-mechanical scanning of reference radiation sources. The compensation with respect to sensitivity and dark components of photo sensor signals is performed. The results of experiments with real images and the program model of the scanning photo sensor array are presented. Variants of functional schemes of the relevant special purpose processors are presented.

*Keywords:* computer vision, photocell array, correction of video signal, geometrical noise.

---

**Andreev Victor P.** — vice-director, doctor tech. sciences, senior research fellow, e-mail: andreevvipa@yandex.ru.

## **МЕТОД ВЫБОРА УПОРЯДОЧЕННОГО НАБОРА ФИЛЬТРОВ ПРЕДОБРАБОТКИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

**Н. И. Дмитриев, А. А. Хрусталеv, А. И. Ляпин, Е. Ю. Суворов**

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
Федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский  
институт измерительных систем имени Ю. Е. Седакова»  
(ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»), Нижний Новгород*

Предлагается параметр оценки качества преобработки изображений и основанный на нем метод выбора упорядоченного набора фильтров преобработки для систем технического зрения реального времени. Рассмотрены три варианта стратегии поиска набора, оптимального по качеству и времени преобработки.

*Ключевые слова:* система технического зрения реального времени, преобработка изображений, качество изображений.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Изображения, получаемые и обрабатываемые в современных системах обработки цифровых изображений и распознавания объектов, могут быть зашумленными и слабоконтрастными. Поэтому в этих системах используются подсистемы преобработки изображений. Основная их задача — повышение контраста объект — фон для выделенных объектов и подавление шумов на изображении.

Преобработка осуществляется упорядоченным набором фильтров. Выбор конкретного содержания набора — сложная инженерная задача и зависит от условий визирования и вида анализируемой сцены с объектом поиска. При этом для систем реального времени в ходе решения задачи необходимо руководствоваться поддержанием баланса между общим временем преобработки и качеством отфильтрованных изображений.

Одна из проблем решения этой задачи — трудность оценки качества отфильтрованных изображений. Чаще всего она производится методом экспертных оценок, т. е. является субъективной величиной. Авторы предлагают объективный параметр оценки качества преобработки изображений и метод выбора упорядоченного набора фильтров преобработки.

### **ПАРАМЕТР ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРЕДОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Для выделения на изображении объектов из фона необходимо, чтобы значение локального контраста объект-фон превышало значение локального контраста объект — объект, т. е. выполнялось условие:

---

**Дмитриев Николай Иванович** — заместитель главного конструктора, доктор технических наук, старший научный сотрудник.

**Хрусталеv Андрей Алексеевич** — начальник отдела, кандидат технических наук, e-mail: akhrust@niiis.nnov.ru.

**Ляпин Александр Игоревич** — начальник сектора, кандидат технических наук.

**Суворов Евгений Юрьевич** — научный сотрудник.

$$\Delta K = K_{\text{оф}} - K_{\text{оо}} > 0, \quad (1)$$

где

$$K_{\text{оф}} = \frac{1}{N_{\text{оф}}^2} \sum_{i,j \in S} \sum_{l,m \in \varepsilon} (I_o(i, j) - I_{\text{ф}}(l, m))^2, \quad (2)$$

$$K_{\text{оо}} = \frac{1}{N_{\text{оо}}^2} \sum_{i,j \in S} \sum_{l,m \in \varepsilon} (I_o(i, j) - I_o(l, m))^2. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta K$  — абсолютная разница оценок локальных контрастов объект-фон и объект-объект;  $K_{\text{оф}}$  — оценка локального контраста объект-фон;  $K_{\text{оо}}$  — оценка однородности объекта (локальный контраст объект-объект);  $I_o(i, j)$  — яркость точки объекта с координатами  $(i, j)$ ;  $I_{\text{ф}}(l, m)$  — яркость точки фона с координатами  $(l, m)$ ;  $N_{\text{оф}}$  — совокупное число разностей объект-фон;  $N_{\text{оо}}$  — совокупное число разностей объект-объект;  $S$  — совокупность всех точек объекта;  $\varepsilon$  — локальная окрестность вокруг точки объекта с координатами  $(i, j)$ .

Для оценки качества преобработки может использоваться величина  $\delta_K$  относительного изменения абсолютной разницы оценок локальных контрастов объект-фон и объект-объект ( $\Delta K$ ) до и после преобработки ( $\Delta K'$ ), вычисляемая по формуле:

$$\delta_K = \frac{\Delta K' - \Delta K}{|\Delta K|}. \quad (4)$$

Очевидно, что при увеличении контраста объект-фон  $\delta_K$  будет принимать значения больше нуля, при уменьшении — меньше нуля, а при неизменном контрасте — нулевое значение.

Однако коэффициент  $\delta_K$  может использоваться только для оценки фильтров, приводящих к преобразованию контраста (яркости). Для фильтров подавления шумов он не годится, так как их применение ведет к отрицательным значениям  $\delta_K$  из-за размывания ими границ объектов. Поэтому проводится модификация  $\delta_K$ .

К нему добавляется слагаемое, отвечающее за изменение однородности объектов. Тогда для оценки качества преобработки, можно использовать коэффициент  $\delta_{KO}$ :

$$\delta_{KO} = \frac{\Delta K' - \Delta K}{|\Delta K|} - \frac{K'_{\text{оо}} - K_{\text{оо}}}{|K_{\text{оо}}|}. \quad (5)$$

Для более полного учета диапазона условий визирования и вида анализируемой сцены с объектом поиска целесообразно использовать величину  $\bar{\delta}_{KO}$ , усредненную по репрезентативной выборке изображений сцены, содержащих объекты поиска при заданных условиях визирования.

Для принятия решения об использовании набора фильтров преобработки должно выполняться условие:

$$\bar{\delta}_{KO} \geq a, \quad (6)$$

где  $a$  — некоторый минимальный порог оценки качества преобработки, вычисляемый эмпирическим путем.

Главное достоинство предложенного коэффициента оценки качества преобработки изображений  $\bar{\delta}_{KO}$  — простота его вычисления.

## МЕТОД ВЫБОРА УПОРЯДОЧЕННОГО НАБОРА ФИЛЬТРОВ ПРЕДОБРАБОТКИ

Так как рассматривается предобработка изображений систем реального времени, то ее длительность  $t_{\text{пред}}$  должна быть ограничена некоторой пороговой величиной  $t_{\text{порог}}$ , т. е. выполняться условие:

$$t_{\text{пред}} \leq t_{\text{порог}} \cdot \quad (7)$$

При этом, чем меньше будет величина  $t_{\text{пред}}$ , при равных значения  $\bar{\delta}_{КО}$ , тем лучше.

Метод выбора упорядоченного набора фильтров предобработки для конкретного объекта поиска при заданных условиях применения сводится к четырем этапам:

- формируется каталог с репрезентативной выборкой изображений анализируемой сцены, содержащих объект поиска при всех заданных условиях применения;
- формируется список возможных вариантов упорядоченных наборов фильтров предобработки\*;
  - \* При формировании данного списка необходимо отбросить все варианты, не удовлетворяющие условию (7). При этом может быть добавлено условие обязательного наличия в наборе одного из фильтров подавления шумов и одного из фильтров повышения контраста (яркости).
- вычисляется значение параметра  $\bar{\delta}_{КО}$  для каждого варианта, путем расчетов  $\delta_{КО}$  для каждого изображения каталога и последующего усреднения на число изображений в каталоге;
- выбирается оптимальный вариант упорядоченного набора фильтров предобработки.

При выборе оптимального варианта упорядоченного набора фильтров предобработки можно руководствоваться одной из трех стратегий:

- *акцент на качество* — оптимальным в этой стратегии будет считаться набор с максимальной оценкой качества предобработки  $\bar{\delta}_{КО}$ . При этом для использования в системе реального времени достаточно выполнения условия (7);
- *акцент на длительность предобработки* — оптимальным будет считаться набор с минимальной длительностью предобработки  $t_{\text{пред}}$  и достаточным ее качеством  $\bar{\delta}_{КО}$ . При этом выбирается набор с минимальным значением  $t_{\text{пред}}$ , для которого выполняется условие (6);
- *баланс качества предобработки и ее длительности* — гибрид первых двух стратегий.

В случае выбора последней стратегии можно использовать мультипликативный коэффициент оценки качества предобработки  $K_{\Phi}$ :

$$K_{\Phi} = \begin{cases} \bar{\delta}_{КО}^{\alpha} T_{\text{пред}}^{-\beta} & \text{при } T_{\text{пред}} \leq 1, \\ 0 & \text{при } T_{\text{пред}} > 1, \end{cases} \quad (8)$$

где  $T_{\text{пред}} = t_{\text{пред}} / t_{\text{порог}}$  — относительное время предобработки;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты важности оценки качества предобработки  $\bar{\delta}_{КО}$  и времени выполнения

структурного фильтра  $T_{\text{пред}}$ , соответственно. Значения  $\alpha$  и  $\beta$  положительны и подбираются эмпирически. Оптимальным будет считаться набор с максимальным значением  $K_{\phi}$ .

Предложенный метод легко автоматизируется, что делает его удобным инструментом для объективного выбора упорядоченного набора фильтров предобработки, позволяющего подавить шумы на изображении и повысить контраст объект – фон.

## ВЫВОДЫ

Предложены параметр оценки качества предобработки изображений  $\bar{\delta}_{KO}$  и метод выбора упорядоченного набора фильтров предобработки, основанный на использовании предложенного параметра. Главное достоинство предложенного параметра  $\bar{\delta}_{KO}$  — простота его вычисления. Основанный на нем метод выбора упорядоченного набора фильтров предобработки представляется удобным и простым инструментом для объективного выбора набора фильтров, позволяющего в реальном времени подавить шумы на изображении и повысить контраст объект – фон.

### METHOD OF THE SELECTION OF THE SEQUENCED SET OF PREPROCESSING FILTERS FOR REAL TIME VISION SYSTEMS

N. I. Dmitriev, A. A. Khrustalev, A. I. Lyapin, Ye.Yu. Suvorov

*FSUE "FRPC NIIS named after Yu.Ye. Sedakov", Nizhny Novgorod*

Images preprocessing quality estimation parameter is proposed and there is selection method of preprocessing filters sequenced set for real time vision systems based on the parameter. There three variants are reviewed for searching strategies of preprocessing filters sequenced set suitable optimum preprocessing quality and time.

*Keywords:* vision system in real time, image preprocessing, image quality.

---

**Dmitriev Nicolay Ivanovich** — deputy chief constructor, Doctor of Technical Sciences, senior scientist.

**Khrustalev Andrey Alexeevich** — head of department, PhD Tech, e-mail: akhrust@niis.nnov.ru.

**Lyapin Alexandr Igorevich** — head of department, PhD Tech.

**Suvorov Yevgeny Yurevich** — research engineer.

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН  
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 15.12.2012

Заказ 3203

Формат  $70 \times 100^1_{/16}$

Тираж 150

48,1 усл.-печ. л.

