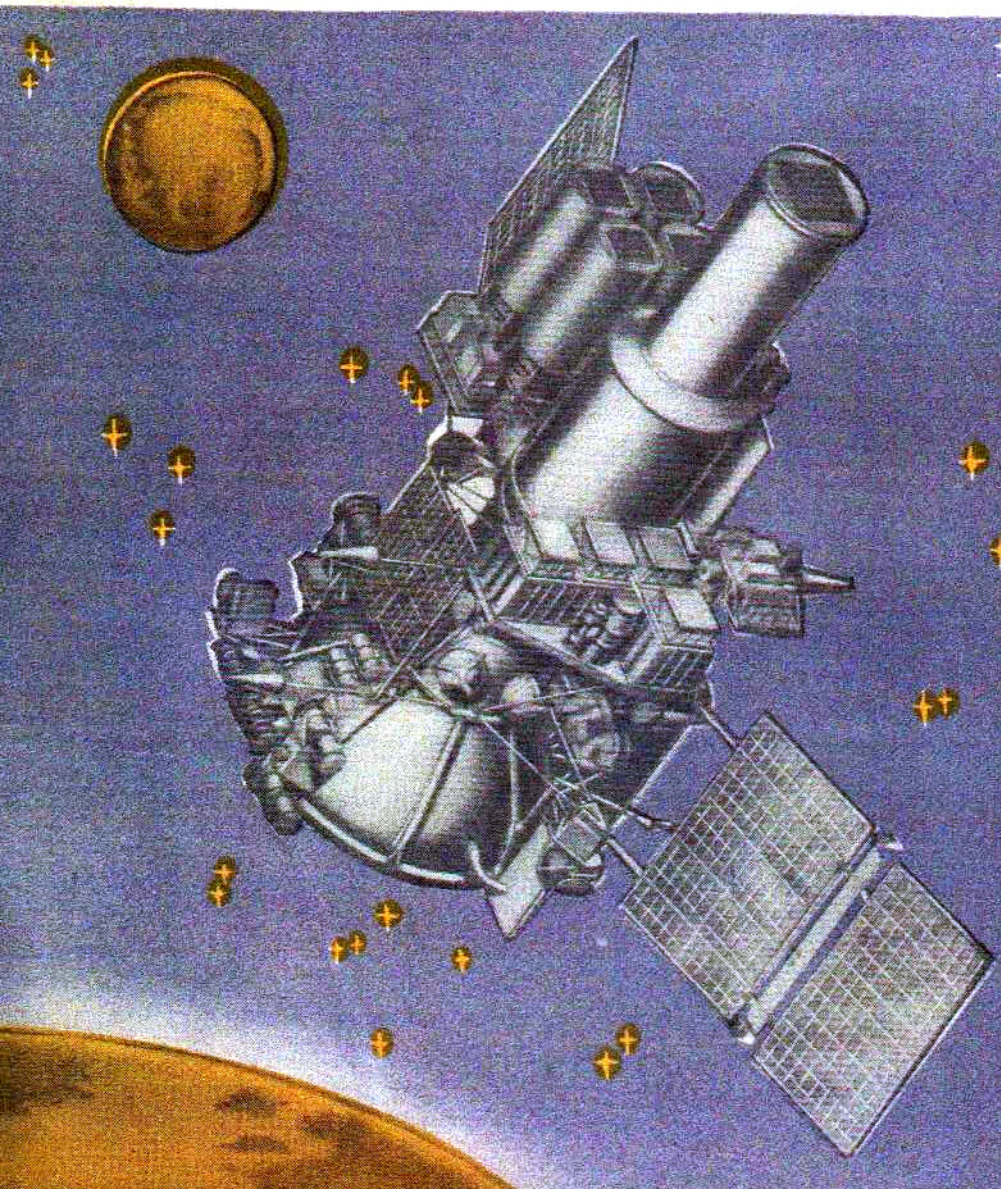


АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



Аппаратура и методы исследования космического пространства. — М.: Наука, 1989. — 237 с.

ISBN 5-02-000040-X

В сборнике описана аппаратура для исследований в области физики космической плазмы, астрофизики высоких энергий, физики планет и планетных атмосфер. Научные приборы и комплексы, а также методы их разработки и испытаний в наземных лабораториях и на специальных стендах были созданы в самое последнее время для крупнейших международных проектов, осуществляемых на космической станции "Фобос" и астрофизическом модуле "Рентген" люминесцирующей станции "Мир", а также для планируемого в самое ближайшее время запуска астрофизической обсерватории "Гранат". Значительная часть из них создается или уже работает впервые. Эта аппаратура создавалась ИКИ АН СССР совместно с другими институтами АН СССР и ведомственными организациями при участии разработчиков широкой международной кооперации.

Сборник обобщает богатый опыт научного космического приборостроения и рассчитан на научных и инженерно-технических работников специального и широкого профиля, а также студентов и аспирантов.

Instruments and methods for space studies. — М.: Nauka, 1989.

This book describes the instrumentation for studying space plasma physics, astrophysics of high energies, physics of planets and planetary atmospheres. Scientific instruments and systems as well as methods for their development and testing in ground-based laboratories with specially-designed stands have been engineered in the last few years for the largest International Projects: the PHOBOS space station, the RENTGEN astrophysical module on the MIR station, and the GRANAT astrophysical observatory planned to be launched in the immediate future. A major part of these instruments are now in the making or the operation for the first time. The Space Research Institute, USSR Academy of Sciences has generated the instrumentation in collaboration with other institutes of the USSR Academy of Sciences and state agencies with the participation of specialists from the countries involved in the wide international cooperation.

The book generalizes a wealth of experience in space instrument engineering; and scientists, engineers, research fellows and students will find authoritative accounts in the chapters with which they are most closely concerned.

Редакционная коллегия:

*В.М. Балабанов (отв. редактор),
Р.А. Стоялов, Т.К. Бреус, Э.В. Воронцов*

Рецензенты:

*доктор физико-математических наук Н.П. Давыдкин,
доктор физико-математических наук профессор А.М. Гальпер*

А 3500000000-470
055 (02)-89 736-89, кн. 2

© Институт космических исследований АН СССР, 1989

ISBN 5-02-000040-X

3. McCormick P.T., Whitten R.C. // Planet. and Space Sci. 1972. Vol. 20. P. 822.
4. Piraglia J., Gross S.H. // Ibid. 1970. Vol. 18. P. 1760.
5. Hanson W.B., Sannami S., Zuccaro D.R. // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 28. P. 4351.
6. Dolginov Sh.Sh. // Geophys. Res. Lett. 1978. Vol. 5, N 1. P. 89-92.
7. Dolginov Sh.Sh. et al. Magnetic field and plasma inside and outside of the martian magnetosphere // Solar Wind interaction with the planet Mercury, Venus, Mars, SP-397, 1976. Wash. (D.C.): NASA, 1982. P. 1-20.
8. Slavin J.A., Holzer R.E. // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, P. 10285-10296.
9. Бреус Т.К., Крымский А.М. Эффект нагружения солнечного ветра при взаимодействии с Ветером и Марсом: Препр. ИКИ АН СССР №1275. М., 1987.
10. Бреус Т.К. // Adv. Space Res. 1986. Vol. 6, N 1. P. 167-177.
11. Бреус Т.К., Крымский А.М., Митицкий В.Я. // Космич. исслед. 1987. Т. 25, вып. 1. С. 124-133.
12. Мороз В.И. Физика планеты Марс. М.: Наука, 1978.
13. Грингуэз К.И., Веригин М.И., Бреус Т.К., Гомбоши Т. // ДАН СССР. 1977. Т. 232. С. 1039-1042.
14. Knudsen W.C., Kicore A.J., Whitten R.C. // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 13381-13399.
15. Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1980. 305 с.
16. Бреус Т.К., Штерн Д.Я., Элькин М.Л. Основные принципы построения бортовой аппаратуры радиозондирования плазменных оболочек планет // Научная аппаратура для космических исследований М.: Наука, 1987. С. 27.
17. Науменко Н.И., Штерн Д.Я., Элькин М.Л. О применении сложных сигналов при радиозондировании околопланетной плазмы // Научная аппаратура для космических исследований. М.: Наука, 1987. С. 34.
18. Кольвах С.В., Элькин М.Л. О оптимизации приемника бортовой аппаратуры планетного ионозонда с короткой антенной // Там же. С. 41.
19. Горбунов Ю.Н. Цифровые методы дальнометрии в импульсных обзорных радиолокаторах // Автометрия. 1988. № 2.

УДК 621.396.967:629.78

Н.А. Арманд¹, Т.К. Бреус², Д.Я. Штерн³,
С.В. Кольвах⁴, А.П. Местартон³, М.Л. Элькин²

ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ФОБОС"

ВВЕДЕНИЕ

В состав научного радиолокационного комплекса (РЛК) космического аппарата (КА) "Фобос" входила ионосферная станция — ионозонд. Высокая орбита КА, малая длина вибраторов антенны, определяемая динамическими и массовыми характеристиками КА, необходимость сжатия информационного потока потребовали нетрадиционного подхода в построении аппаратуры ионозонда, ряд особенностей которого изложен в статье Т.К. Бреус, А.М. Крымского, Д.Я. Штерна, М.Л. Элькина в настоящем сборнике.

¹ ИРЭ АН СССР.

² ИКИ АН СССР.

³ СКБ ИРЭ АН СССР.

⁴ Ростовский государственный университет.

⁵ РКНИГА, г. Рыга.

Для радиозондирования ионосферы Марса с круговой орбиты с марсоцентрическим расстоянием около 9,5 тыс. км необходимо было увеличить дальность действия ионозонда аппаратуры РЛК почти на порядок, а энергетический потенциал на два порядка по сравнению с известными разработками [1, 2]. Ограниченные массы, габаритов, энергопотребления, а также длины антенны в развернутом состоянии потребовало для увеличения энергетического потенциала ионозонда применения резонансного согласования приемопередатчика с антенной, кодирования зондирующего радиопульса по Баркеру и накопления сигнала [3–6]. В состав аппаратуры радиозондирования входит компьютер для предварительной обработки сигнала. Он осуществляет свертку кода Баркера и накопление посылок, а также сжатие данных и формирует телеметрический кадр.

1. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ

На рис. 1 дана функциональная схема ионозонда РЛК проекта "Фобос", с помощью которого должен был осуществляться эксперимент "Плазма" — получение высотных профилей электронной концентрации $N_e(h)$ в верхней ионосфере Марса.

Научные задачи, решаемые в этом эксперименте, а также методические проблемы, связанные с особенностями проведения эксперимента в проекте "Фобос", изложены в другой работе настоящего сборника¹.

Ионозонд аппаратуры РЛК представляет собой когерентно-импульсную радиолокационную станцию, зондирующий импульс которой фазоманипулирован 13-позиционным кодом Баркера.

Диапазон зондирующих частот 182–2733 кГц разбит на три поддиапазона с дискретным шагом перестройки. Шаг перестройки внутри каждого поддиапазона переменный — увеличивается с ростом частоты и имеет величину от 12 до 41 кГц в первом поддиапазоне, от 46 до 81 кГц — во втором и от 92 до 163 кГц — в третьем. В каждом поддиапазоне 16 частотных точек, всего 48 точек. Разбиение на поддиапазоны и изменение шага перестройки частот в каждом поддиапазоне связаны с обеспечением приблизительно постоянного относительного разрешения аппаратуры по электронной концентрации.

Мощный радиопульс, подаваемый в антенну через согласующее устройство, формируется передатчиком, состоящим из широкополосного предварительного усилителя и усилителя мощности. Излучение и прием сигналов происходит с помощью симметричного вибратора.

Отраженный сигнал попадает в приемную антенну и далее через согласующее устройство и антенный переключатель в приемник "Плазма".

Сигналы с выходов фазовых детекторов приемника поступают на коммутатор аналого-цифрового преобразователя (АЦП) встроенного компьютера. Далее они квантуются в АЦП и запоминаются в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) компьютера для последующей обработки.

Обработка информации — "сжатие" кодовой последовательности и накопление посылок осуществляются с помощью компьютера.

¹ Бреус Т.К., Крымский М.А., Штерн Д.Я., Элькин М.Л. "Научные задачи эксперимента "Плазма" в проекте "Фобос" и принципы измерения электронной концентрации в ионосфере Марса". См. наст. сб.

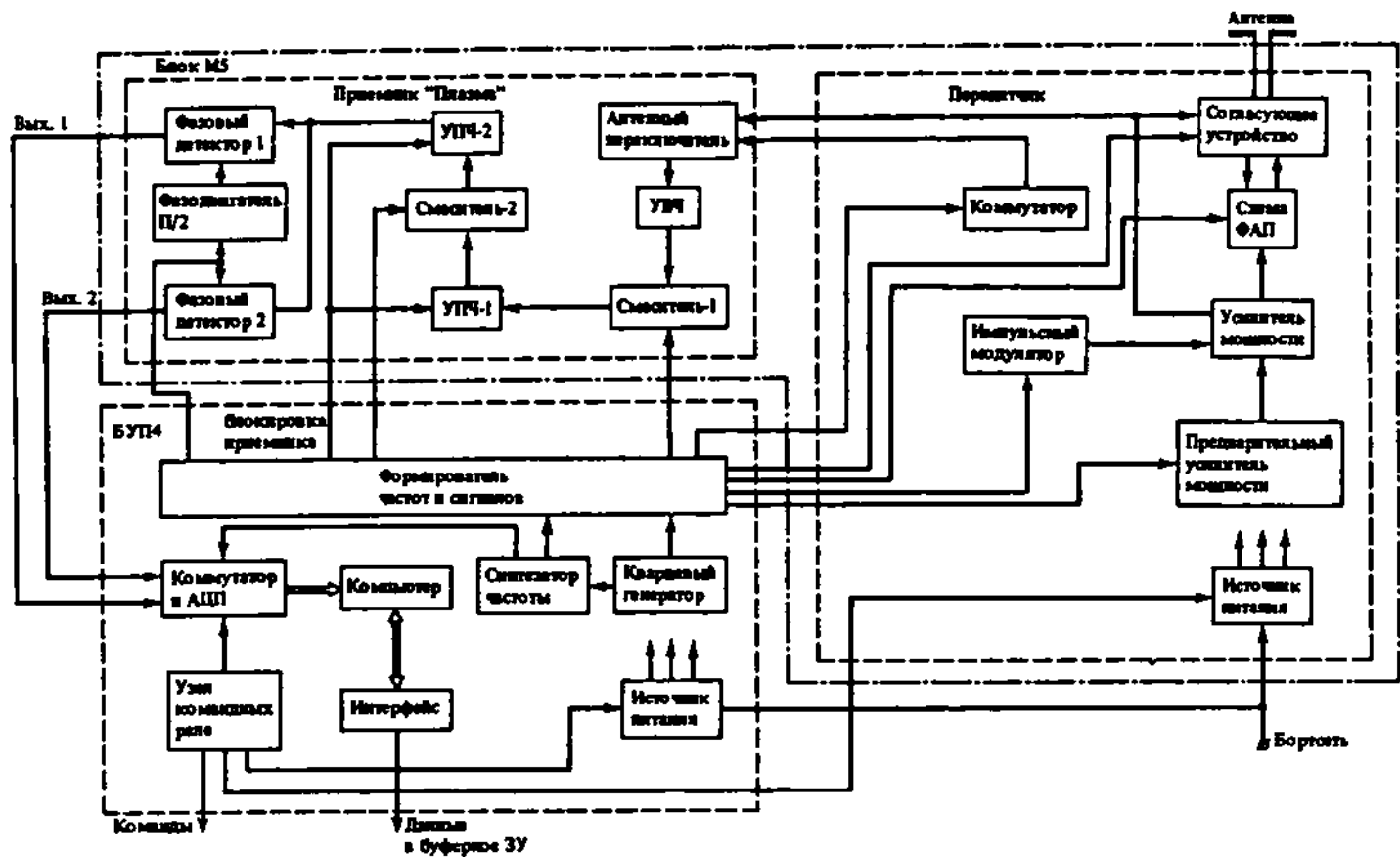


Рис. 1. Функциональная схема РЛК в режиме "Плазма"

После обработки научная информация вместе с аналоговыми сигналами контроля работоспособности аппаратуры переписывается в служебное ЗУ в форме готовой для передачи по каналу телеметрии на наземный пункт связи.

Предусмотрен режим считывания информации в служебное ЗУ без предварительной обработки в компьютере с целью получения дополнительной научной информации и повышения точности измерений. Объем информации за два цикла измерений составляет около 4Мбит, поэтому режим передачи информации без обработки в компьютере рассматривается как дополнительный. Необходимость сброса информации без обработки решается в оперативном порядке после предварительной обработки и оценки поступающей информации по телеметрии на наземный пункт связи.

Перестройка частот зондирующего сигнала и частоты настройки приемника осуществляется при помощи блока управления и преобразования частот (БУПЧ), исходная частота в котором задается кварцевым генератором.

Радиопульсы для возбуждения передатчика, гетеродинирующие и опорные сигналы, необходимые для работы приемника, а также управляющие сигналы, необходимые для работы всех блоков и устройств РЛК, формирует БУПЧ. В состав БУПЧ входит компьютер.

Согласующее устройство, включенное между антенной и передатчиком РЛК, служит для компенсации емкостного сопротивления антенны. Настройка антенного контура в резонанс осуществляется с помощью схемы фазовой автоподстройки.

2. РЕЗОНАНСНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ АНТЕННЫ

Серьезной проблемой при разработке монозонда в аппаратуре РЛК было обеспечение эффективной работы передатчика и приемника на короткую дипольную антенну в широком диапазоне частот зондирования.

В РЛК используется дипольная антенна длиной 40 м (два штыря по 20 м), выбранной по результатам конструкторских проработок с учетом особенностей космического аппарата.

В низкочастотной части диапазона длина плеча вибратора составляет примерно 0,01 длины волны (длина волны на нижней частоте зондирования при $f = 180$ кГц составляет примерно 1650 м). Таким образом, в большей части диапазона зондирующих частот антенна оказывается намного меньше половины длины волны и обладает большим емкостным сопротивлением.

Эквивалентная схема короткой антенны может быть представлена последовательно соединенными емкостным сопротивлением X_A и активным сопротивлением — сопротивлением излучения R_A . Для 40-метрового диполя на частоте 180 кГц $R_A \approx 0,1$ Ом, $X_A \approx 10^4$ Ом. Излучаемая мощность определяется падением напряжения на сопротивлении излучения, которое относительно мало, так как практически все входное напряжение падает на большом емкостном сопротивлении, которое ограничивает ток в антенне. Расчеты показывают, что при традиционном построении потери на излучение составили бы на частоте 180 кГц величину порядка 70 дБ.

В монозонде РЛК применено резонансное согласование антенной цепи. В цепь антенны включена переменная управляемая индуктивность — ферро-

вариометр [4], которая компенсирует емкостную составляющую, тем самым увеличивая ток в антенне. Резонанс антенной цепи обеспечивается на всех рабочих частотах, так как индуктивность управляется схемой автоподстройки.

Резонансное согласование антенны весьма полезно и в режиме приема. Во-первых, оно обеспечивает заметный выигрыш в чувствительности — собственные шумы приемника оказываются ниже галактического шума [5]; во-вторых, выполняет роль преселектора.

Особенностью феррвариометра является то, что он выполнен на ферритовом сердечнике, а высокочастотные сигнальные обмотки и управляющая обмотка подмагничивания не имеют связи по высокочастотному магнитному полю. Индуктивность высокочастотных обмоток изменяется путем подмагничивания ферритового сердечника постоянным током. Величина индуктивности изменяется в соответствии с частотой передатчика, обеспечивая резонанс антенного контура на всех частотах. Для расширения частотного диапазона феррвариометра высокочастотные сигнальные обмотки соединяются последовательно и параллельно с помощью коммутатора на высоковольтных герконах.

Автоматическая настройка в резонанс при изменении частоты передатчика осуществляется схемой автоподстройки, реагирующей на соотношение фаз тока и напряжения на выходе передатчика. Величина подмагничивания сердечника устанавливается такой, при которой ток синфазен напряжению. Эффект резонансного согласования достигается как при последовательном, так и при параллельном включении феррвариометра в антенную цепь. При параллельном включении феррвариометра его индуктивность с емкостью антенны образуют параллельный колебательный контур. При этом за счет противофазности тока в его ветвях суммарный ток, т.е. выходной ток передатчика, будет значительно (в соответствии с добротностью контура) меньше тока антенны. В РЛК параллельное включение феррвариометра позволило объединить его с выходным трансформатором передатчика и довести коэффициент трансформации в нем до 40. Достижение столь высокого коэффициента трансформации оказалось возможным, так как индуктивность феррвариометра изменяется в соответствии с рабочей частотой. В монозонде РЛК за счет резонансного согласования с антенной потери мощности передатчика при излучении по сравнению с аперриодической схемой согласования [3] снижены на нижней частоте зондирования приблизительно в 40 раз.

3. ПРИМЕНЕНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ И НАКОПЛЕНИЯ

Применение для зондирования сложного сигнала со сжатием в приемном устройстве обеспечивает улучшение фактической чувствительности за счет уменьшения порогового отношения сигнал/шум без ухудшения разрешающей способности и точности. Возможность использования бинарного фазокодированного сигнала на основе последовательностей Баркера отмечалась в работе [6].

Применение бинарного фазоманипулированного сигнала позволяет при обработке в приемном канале увеличить отношение сигнал/шум. В данном случае была выбрана 13-импульсная последовательность Барке-

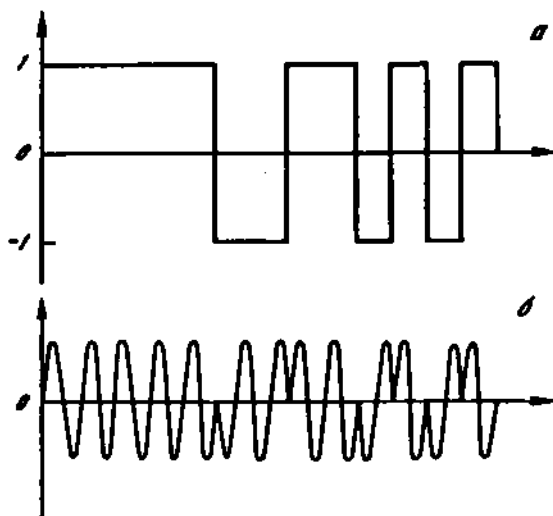


Рис. 2. Видеосигнал (а) и высокочастотный фазоманипуляционный сигнал на основе 13-позиционного кода Баркера (б)

ра, которая обеспечит увеличение отношения сигнал/шум более чем на порядок. Сигнал состоит из 13 притегающих друг к другу субимпульсов одинаковой амплитуды, различающихся значениями фаз 0 или π (рис. 2). Длительность зондирующего сигнала, как уже отмечалось выше, составляет 17 мс, длительность субимпульса 1,3 мс. Обработка сводится к нахождению взаимной корреляции выходного сигнала приемника с опорным сигналом, повторяющим структуру зондирующего. В результате выделяется сигнал длительностью, равной длительности субимпульса, и амплитудой, в 13 раз превышающей амплитуду принятого отраженного сигнала. Таким образом, обеспечивается 13-кратный выигрыш в чувствительности приемного канала по сравнению с простым импульсным зондирующим сигналом длительностью, равной длительности субимпульса.

В компьютере РЛК или при наземной цифровой обработке осуществляется когерентное накопление сигналов. Так как при когерентном накоплении требуется сохранение фазы отраженного сигнала, допустимое число когерентно накапливаемых импульсов ограничено влиянием ожидаемых скоростей изменения расстояния до отражающего слоя за счет ионосферных неоднородностей. Выбор кратности когерентного накопления сделан по результатам экспериментальных оценок скоростей движения плазменных образований в земной ионосфере при подготовке эксперимента, а также оценок данных, полученных на КА "Марс-2, -3, -5" и "Викинг-1, -2" [9, 10].

Описываемая процедура обработки является частью программы обработки сигналов в компьютере РЛК. Программа включает, кроме когерентного накопления сигналов за 2–32 периода в зависимости от частотной точки, некогерентное накопление сигнала за 2–16 периодов.

Число накоплений зависит от частоты излучения РЛК. На частотах первого поддиапазона производится накопление 64 посылок, а на втором и треть-

ем — 32. Различие в числе накопленных объясняется необходимостью на нижних частотах иметь большой потенциал станции для достижения отношения сигнал/шум, достаточного для измерений. С учетом сказанного цикл снятия одной монограммы занимает 213 с.

Объем данных после "сжатия" кодовой последовательности и накопления посылок на одну монограмму из 48 частотных точек при четырех отсчетах на субимпульс кодовой последовательности достигает 430 кбит. Эти данные имеют значительную избыточность, поэтому с помощью специального алгоритма подвергаются сжатию. После сжатия объем информации на одну монограмму уменьшается приблизительно до 25 кбит.

Кроме основного, предусмотрен дополнительный режим работы РЛК при зондировании ионосферы, включающийся командой "Выбор режима" "Плазма". При этом отключается обрабатывающая часть компьютера, и сигналы приемника после преобразования в АЦП подаются на штатное ЗУ космического аппарата. Дальнейшая обработка информации осуществляется на ЭВМ наземного пункта управления и связи. Такой режим предусмотрен для резервирования и при необходимости сохранения научной информации, теряемой при сжатии данных.

Характеристика	Величина	Единица измерения	Характеристика	Величина	Единица измерения
Диапазон зондирующих частот	0,182–2,73	МГц	Модуляция сигнала — фазовая		
Первый поддиапазон	0,182–0,527	МГц	13-позиционным кодом Баркера		
Второй поддиапазон	0,573–1,262	МГц	Частота повторения	9,6	Гц
Третий поддиапазон	1,354–2,733	МГц	Количество информации на одну монограмму		
Амплитуда напряжения на антенне, не менее			до сжатия данных	2090	кбит
в первом поддиапазоне	2000	В	после сжатия	25	кбит
во втором поддиапазоне	900	В	Число зондирующих посылок		
в третьем поддиапазоне	300	В	в первом поддиапазоне	64	
Число дискретных точек в поддиапазоне частот	16		во втором и третьем поддиапазонах	32	
Максимальная дальность зондирования, более	6000	км	Время снятия одной монограммы	213	с
Ошибка измерения дальности, не более	20	км	Масса блоков электроники	14,6	кг
Длительность посылки	17,1	мс	Масса антенны	12,6	кг
Длительность подимпульса	1,3	мс	Потребление, не более	85	Вт
			Длина одного штюра антенны	20	м
			Диаметр штюра	24	мм

Интерфейс БУПЧ в режиме ионосферных измерений передает сигналы цифровой телеметрии РЛК в ЗУ космического аппарата, транслирует обменные сигналы ЗУ космического аппарата и компьютера РЛК, а также передает аналоговую телеметрическую информацию, служащую для контроля работоспособности РЛК.

Плата командных реле служит для выполнения команд изменения режима работы, включения и выключения РЛК, поступающих по каналу телеметрии из наземного пункта управления.

Источник питания в БУПЧ предназначен для создания напряжений постоянного тока, которые необходимы для работы приемника "Плазма" и самого БУПЧ.

Технические характеристики ионозонда приведены в таблице.

4. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

Аналоговые сигналы с двух квадратурных выходов 1 и 2 приемника "Плазма" дискретизируются и преобразуются с помощью АЦП в последовательность пар чисел X и Y соответственно. Частота дискретизации выбрана такой, чтобы на субимпульс сигнала приходилось четыре выборки.

Обработка сигнала необходима для выделения сигнала из шумов аппаратуры и внешних помех (галактических) с целью увеличить отношение сигнал/шум. Для того чтобы реализовать такую обработку сигнала, аппаратура РЛК на каждой частотной точке диапазона зондирования осуществляет многократное излучение и прием сигнала (на нижних частотах диапазона 64 раза, на верхних — 32). Обработка данных ведется в реальном масштабе времени.

Выделение сигнала заключается в его накоплении (когерентном и некогерентном) и в корреляционной обработке — свертке сигнала с кодом Баркера.

Начинается алгоритм обработки с записи данных в ОЗУ компьютера.

Прием данных осуществляется во время действия стробирующего импульса. Стробирующий импульс задержан относительно импульса передатчика на время, равное 36,7 мс.

Для того чтобы можно было обрабатывать данные и принимать очередные выборки, прием данных осуществляется по запросам прерывания во время действия стробирующих импульсов. Программа обработки данных (фоновая программа) при необходимости прерывается, идет прием данных, а затем снова продолжается работа фоновых программ. Данные группируются по номеру выборки в субимпульсе в виде восьми матриц вида

$$X_j^{(k)} = \begin{bmatrix} X_{1,1}^{(k)} & \dots & X_{1,2}^{(k)} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{26,1}^{(k)} & \dots & X_{26,2}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad Y_j^{(k)} = \begin{bmatrix} Y_{1,1}^{(k)} & \dots & Y_{1,2}^{(k)} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{26,1}^{(k)} & \dots & Y_{26,2}^{(k)} \end{bmatrix}.$$

Здесь и далее $k = 1, 2, 3, 4$ — номер выборки в субимпульсе; j — номер группы накопления (некогерентного).

Каждая из этих матриц содержит 26 строк и Z столбцов (Z — число когерентных накоплений) и располагается в ОЗУ компьютера.

Число когерентных накоплений может изменяться в зависимости от час-

тоты зондирования (номера дискретной точки), а также физических условий работы и принимать значения $Z = 32, 16, 8, 4$.

Обработка принятых данных идет после приема Z накоплений. Окончательная обработка данных по дискретной точке проводится либо по 64 накоплениям (2 группы ($j = 2$) по 32 когерентных накопления ($Z = 32$), или 4 группы ($j = 4$) по 16 когерентных накоплений ($Z = 16$), или 8 групп ($j = 8$) по 8 когерентных накоплений ($Z = 8$) для дискретных точек I поддиапазона частот зондирования), либо по 32 накоплениям ($j = 2, Z = 16; j = 4, Z = 8; j = 8, Z = 4$) для дискретных точек II и III поддиапазонов частот зондирования.

Когерентное накопление сигнала идет после Z зондирований на одной частотной точке и заключается в суммировании столбцов матриц $X_j^{(k)}$ и $Y_j^{(k)}$ для получения вектор-столбцов вида

$$[SX^{(k)}]_j = \begin{bmatrix} X_1^{(k)} \\ \vdots \\ X_{26}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad [SY^{(k)}]_j = \begin{bmatrix} Y_1^{(k)} \\ \vdots \\ Y_{26}^{(k)} \end{bmatrix}.$$

В каждом из полученных восьми вектор-столбцов выделяются четырнадцать векторов, состоящих из тринадцати последовательно расположенных элементов в каждом (всего 112 векторов):

$$[SX^{(k)}]_{i,j} = \begin{bmatrix} X_i^{(k)} \\ \vdots \\ X_{i+13}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad [SY^{(k)}]_{i,j} = \begin{bmatrix} Y_i^{(k)} \\ \vdots \\ Y_{i+13}^{(k)} \end{bmatrix}.$$

Здесь и далее $i = 1, 2, \dots, 14$.

Когерентное накопление сигнала завершается вычислением скалярного произведения (корреляционной функции) каждого из 112 векторов на вектор-код Баркера по формуле

$$[SBX^{(k)}]_{i,j} = \begin{bmatrix} X_i^{(k)} \\ X_{i+1}^{(k)} \\ \vdots \\ X_{i+13}^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = X_{i,j}^{(k)} + X_{i+1,j}^{(k)} + X_{i+3,j}^{(k)} +$$

$$X_{i+3,j}^{(k)} + X_{i+4,j}^{(k)} - X_{i+5,j}^{(k)} - X_{i+6,j}^{(k)} + X_{i+8,j}^{(k)} + X_{i+8,j}^{(k)} - X_{i+9,j}^{(k)} +$$

$$+ X_{i+10,j}^{(k)} - X_{i+11,j}^{(k)} + X_{i+12,j}^{(k)}.$$

В результате вычислений получаются 112 сумм при определенном значении индекса i -номера группы некогерентного накопления:

$$[SBX^{(k)}]_{i,j}; \quad [SBY^{(k)}]_{i,j},$$

$j = 2, 4, 8$ в зависимости от диапазона зондирования (номера дискретной точки).

Следующим шагом алгоритма является вычисление суммарной мощнос-

ти каналов приемника согласно выражению

$$P_{i,j}^{(k)} = [SBX^{(k)}]_{i,j}^2 + [SBY^{(k)}]_{i,j}^2.$$

В результате получается 56 значений мощности при определенном значении индекса j .

Значение индекса j показывает количество некогерентных накоплений на данной частоте зондирования. Число некогерентных накоплений j зависит от номера дискретной точки, т.е. от зондирующей частоты и от физических условий зондирования и принимает значения $j_{\max} = 2, 4, 8$.

Некогерентное накопление сигнала реализуется суммированием соответствующих значений мощностей ряда последовательных групп накоплений для каждой дискретной точки по формуле

$$\{P^{(k)}\}_i = \sum_{j=1}^{j_{\max}} P_{i,j}^{(k)}.$$

В результате получается по четырнадцать значений мощности для каждого значения номера выборки в субимпульсе k .

Далее для каждой дискретной точки из четырнадцати значений мощности при фиксированном значении k определяется максимальное ее значение и положение максимума, т.е. находятся значения i , при которых $P^{(1)}$, $P^{(2)}$, $P^{(3)}$ и $P^{(4)}$ имеют максимальные значения. В общем случае значения i могут быть различными для разных $P^{(k)}$. Если максимумов несколько внутри ряда значений мощности $P^{(1)}$ (или $P^{(2)}$, или $P^{(3)}$, или $P^{(4)}$), выбирается максимум, находящийся слева, т.е. с наименьшим значением i .

После определения максимальных значений мощности $P^{(k)}$ производится нормализация каждого из массивов $P^{(1)}$, $P^{(2)}$, $P^{(3)}$ и $P^{(4)}$ в отдельности для каждой дискретной точки. У всех чисел массива $P^{(k)}$ отбрасываются старшие разряды в количестве, указанном байтом нормализации; в памяти сохраняются однобайтные числа массива и байт нормализации. Младшие разряды чисел тоже отбрасываются.

По 24 дискретным точкам производится формирование телеметрического кадра. Одна нонограмма (48 точек) размещается в двух телеметрических кадрах. Цикл работы аппаратуры РЛК заключается в последовательном снятии двух нонограмм. Данные за один цикл работы размещаются в четырех телеметрических кадрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франклин К.А., Маклин М.А. Разработка ионосферной станции с качанием частоты для зондирования внешней ионосферы // ТИИЭР. 1969. Т. 57, № 6. С. 46-82.
2. Аппаратура для исследований внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1971. 305 с.
3. Бреус Т.К., Штерн Д.Я., Зелькин М.Л. Основные принципы построения бортовой аппаратуры радиозондирования плазменных оболочек планет // Научная аппаратура для космических исследований. М.: Наука, 1987. С. 27-33.
4. Бреус Т.К., Крымский А.М., Штерн Д.Я., Зелькин М.Л. Научные задачи эксперимента "Плазма" в проекте "Фобос" и принципы измерения электронной концентрации в ионосфере Марса // Науч. сб.
5. Кольвах С.В., Зелькин М.Л. О согласовании бортовой аппаратуры планетного зонда с короткой автономной // Научная аппаратура для космических исследований. М.: Наука, 1987. С. 41-47.

6. Науменко И.И., Штерн Д.Я., Элькин М.Л. О применении сложных сигналов при радиозондировании околопланетной плазмы // Там же. С. 34-40.
7. Харц Т.Р. Уровень шумов в ионосфере и вышележащей области // ТИИЭР. 1969. Т. 57, № 6. С. 207-216.
8. Воронин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
9. Hanson W.B., Sanatani S., Zuccaro D.R. The Martian ionosphere as observed by the Viking Retarding Potential Analyzers // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82. P. 4351.
10. Васильев М.Б. и др. Предварительные результаты двухчастотного радиопросвечивания ионосферы Марса при помощи станций "Марс" в 1974 г. // Космич. исслед. М.: Наука, 1975. Т. 13, вып. 1.

УДК 621.396.967

С.В. Кольвах,¹ В.М. Марченко,¹ С.В. Сердюк¹

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ИОНОЗОНДА РЛК

ВВЕДЕНИЕ

Бортовой ионозонд в составе радиолокационного комплекса РЛК-84 используется в проекте "Фобос" для получения профилей электронной концентрации верхней ионосферы Марса.

Высота орбиты космического аппарата (КА) "Фобос" составляет 6 тыс. км над поверхностью планеты, а с учетом выпуклости отражающей поверхности ионосферы [1] эффективная дальность действия зондирующей аппаратуры должна была обеспечиваться на ≈ 16 тыс. км. Это на порядок больше дальности действия спутниковых ионозондов, использовавшихся до сих пор на околоземных орбитах.

В связи с этим в ионозонде РЛК для увеличения энергетического потенциала применены специальные технические решения: резонансное согласование приемопередающего канала с антенной во всем диапазоне частот зондирования [1, 2] и использование сложного зондирующего сигнала с последующим накоплением [3]. Резонансное согласование осуществляется введением в антенный контур индуктивности, компенсирующей емкостную составляющую импеданса антенны. Ее величина изменяется в соответствии с частотой передатчика, обеспечивая резонанс антенного контура на всех частотах. Такая система реализована с помощью ферровариометра — катушки с ферритовым сердечником, индуктивность которой изменяется путем подмагничивания сердечника. Применение сложных фазоманипулированных сигналов позволило увеличить энергию зондирующего сигнала путем увеличения его протяженности и выбирать ширину спектра исходя из требуемой разрешающей способности и точности по дальности. Так как такие решения в бортовом ионозонде используются впервые, представлялась необходимой экспериментальная проверка их эффективности.

¹ Ростовский государственный университет.