

**К. И. Грингауз, В. А. Рудаков,
А. В. Канорский**

АППАРАТУРА ДЛЯ РАКЕТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ

В настоящей статье кратко описывается комплекс радиоаппаратуры, используемой для изучения распределения по высоте электронной концентрации в ионосфере при помощи вертикально запускаемых геофизических ракет Академии наук СССР [1,2]. В этот комплекс входят: а) устанавливаемый на ракете блок радиопередатчиков с передающими антеннами, б) наземные приемные антенны, в) приемно-фазометрические устройства, г) регистрирующая и вспомогательная аппаратура.

В основу разработки был положен принцип дисперсионного интерферометра, предложенный академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси в 1937 г. [3]. Методика измерений, основания для выбора радиочастот, а также результаты измерений приводятся в [4]. Здесь отметим лишь, что измерения состоят в определении происходящего вследствие дисперсии радиоволн в ионосфере изменения разности фаз двух принятых на Земле когерентных колебаний, излученных с ракеты. С 1954 и до 1958 г. для этой цели использовались радиоволны с частотами $f_1 = 144$ Мгц и $f_2 = 48$ Мгц; с 1958 г. наряду с указанными частотами была использована третья частота $f_3 = 24$ Мгц (с дополнительной регистрацией разности фаз частот f_1 и f_3). Под разностью фаз двух колебаний с разными частотами $f_1 = pf_2$ и f_2 , где $p > 1$, понимается величина $\Delta\Phi = \varphi_1 - p\varphi_2$, т. е. разность фаз, приведенная к более высокой частоте.

Для вычисления средней электронной концентрации n_e по интервалу высот Δh , которому соответствует зарегистрированное изменение разности фаз $\Delta\Phi$, используется выражение

$$n_e = k \frac{\Delta\Phi}{2\pi\Delta h} \text{ электрон} \cdot \text{см}^{-3} \quad (1)$$

(здесь $\Delta\Phi$ выражено в радианах, а Δh — в м). Коэффициент k зависит от частот колебаний, изменение разности фаз которых регистрируется, и от коэффициента умножения частоты в приемном устройстве. Для описываемой аппаратуры $k_{f_1, f_2} = 2,25 \cdot 10^7$ (для частот f_1, f_2) и $k_{f_1, f_3} = 0,515 \cdot 10^7$ (для частот f_1, f_3).

Регистрация напряжений на входах приемных устройств позволяет измерять вращение плоскости поляризации принимаемых радиоволн (по поляризационным замираниям сигналов, принятых антенной с линейной поляризацией). При пусках ракет, полностью стабилизированных* на

* При такой стабилизации три взаимно перпендикулярных оси, жестко скрепленные с ракетой, во время полета не меняют своей ориентации.

участке свободного полета, поворот плоскости поляризации принимаемых радиоволн обусловлен только эффектом Фарадея. В этом случае, измеряя θ — угол поворота плоскости поляризации радиоволн с данной частотой, легко определить n_e в интервале высот Δh , соответствующем повороту на угол θ :

$$n_e = M \frac{\theta}{2\pi H_B \Delta h} \text{ электрон} \cdot \text{см}^{-3}, \quad (2)$$

где H_B — вертикальная компонента геомагнитного поля в районе запуска ракеты (с учетом высоты) в эрстедах; Δh — путь (в км), пройденный ракетой за время поворота плоскости поляризации на угол θ ; M — коэффициент, зависящий от частоты радиоволн. Для частот f_1 , f_2 и f_3 имеем $M_{f_1} = 56 \cdot 10^6$, $M_{f_2} = 6,2 \cdot 10^6$ и $M_{f_3} = 1,55 \cdot 10^6$.

Для всех указанных измерений необходимо знать координаты ракеты в каждый момент полета, для чего регистрация разностей фаз и амплитуд принятых сигналов должна совмещаться с регистрацией меток времени.

В 1954—1958 гг. аппаратура подвергалась изменениям; в настоящей статье описана аппаратура, применяющаяся в последнее время.

1. БОРТОВОЙ БЛОК РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Бортовой блок радиопередатчиков вырабатывает когерентные колебания с тремя частотами f_1 , f_2 и f_3 . Для каждой частоты имеется отдельный выход, рассчитанный на симметричную нагрузку сопротивлением 100 ом. Мощность на выходах соответственно равна $P_1 = 15 \text{ вт}$; $P_2 = 8 \text{ вт}$ и $P_3 = 3 \text{ вт}$. Скелетная схема блока передатчиков приведена на рис. 1.

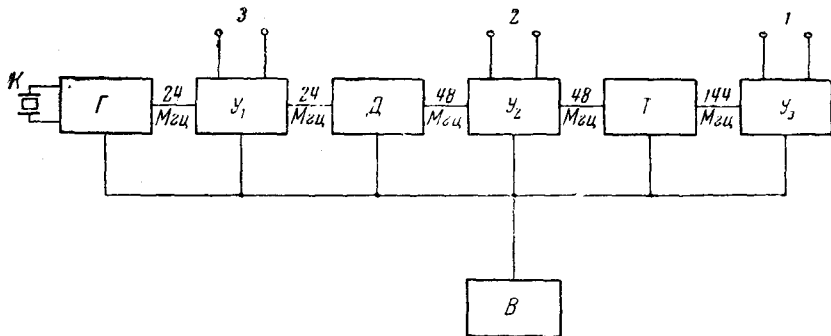


Рис. 1. Скелетная схема блока передатчиков.

Г — генератор; К — кварц ($f = 8 \text{ МГц}$); $У_1$ — усилитель на частоте $f_3 = 24 \text{ МГц}$; Д — удвоитель частоты; $У_2$ — усилитель на частоте $f_2 = 48 \text{ МГц}$; Т — утроитель частоты; $У_3$ — усилитель на частоте $f_1 = 144 \text{ МГц}$; В — выпрямитель; 1, 2, 3 — выходы частот f_1 , f_2 , f_3 , соответственно

Когерентность колебаний на выходах обеспечивается тем, что эти колебания получаются в результате последовательного умножения частоты колебаний общего задающего генератора. Задающий генератор стабилизирован кварцем, помещенным в термостат.

Передатчик питается от выпрямителя, который в свою очередь получает питание от трехфазного унформера переменного тока. Выпрямитель собран на полупроводниковых диодах.

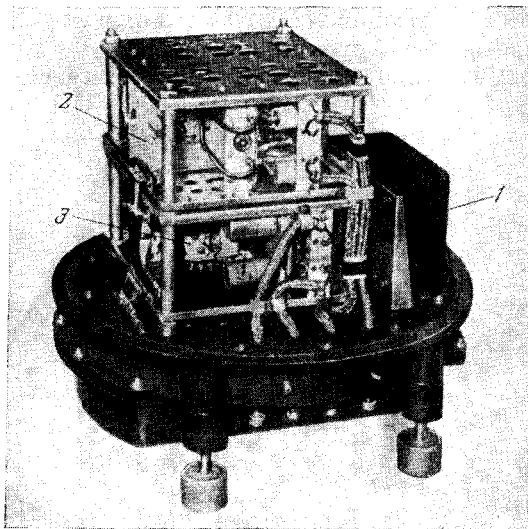


Рис. 2. Блок передатчиков без кожуха.

1 — задающий генератор; 2 — блок канала f_1 ;
3 — блок каналов f_2 и f_3

Блок передатчиков с выпрямителем заключен в герметичный кожух. Представление о конструкции блока передатчиков дает рис. 2.

2. БОРТОВЫЕ ПЕРЕДАЮЩИЕ АНТЕННЫ

В качестве передающих антенн используются симметричные линейные вибраторы, установленные в верхней части ракеты, к которым подводятся высокочастотные колебания от блока радиопередатчиков. Для излучения радиоволн с частотами f_1 и f_2 используется один общий вибратор, возбуждаемый одновременно двумя колебаниями. Для излучения радиоволн с частотой f_3 используется отдельный вибратор.

Возбуждение первого вибратора одновременно двумя частотами было впервые применено на ракетах, не стабилизированных во время свободного полета, с целью уменьшения возможных погрешностей измерений, обусловленных вращением ракеты. В случае использования двух разнесенных передающих антенн при произвольном вращении ракеты во время свободного полета разность геометрических расстояний между соответствующими передающими и приемными антеннами может изменяться, вследствие чего будут возникать паразитные изменения измеряемой разности фаз. Применение совмещенной антенны (возбуждаемой на двух частотах) исключает погрешности, обусловленные изменением расстояний, однако при этом остаются некоторые погрешности, связанные с возможными различиями фазово-пространственных характеристик антенны для каждой из частот.

Схема соединений и конструкция вибраторов иллюстрируются рис. 3. Геометрическая длина каждого плеча короткого вибратора B_1 (для частот f_1 и f_2) — 0,5 м; длинного B_2 (для частоты f_3) — 1 м. Электрические длины для частот f_1 , f_2 и f_3 составляют $1/4\lambda_1$, $1/12\lambda_2$ и $1/12\lambda_3$ соответственно. Ширина полосы частот короткого вибратора (на уровне коэффициента бегущей волны по мощности 0,5) равна 8 Мгц для частоты f_1 и 1,2 Мгц для частоты f_2 , что вполне обеспечивает устойчивость настройки антенн.

Короткий вибратор выполнен в виде двух короткозамкнутых отрезков коаксиальной линии. Питание вибратора на частоте f_1 осуществляется через внешний проводник (трубку), на частоте f_2 — через внутренний. Настройка трактов питания производится соответственно короткозамкнутыми шлейфами 1 и 2 и трансформаторами 3 и 4.

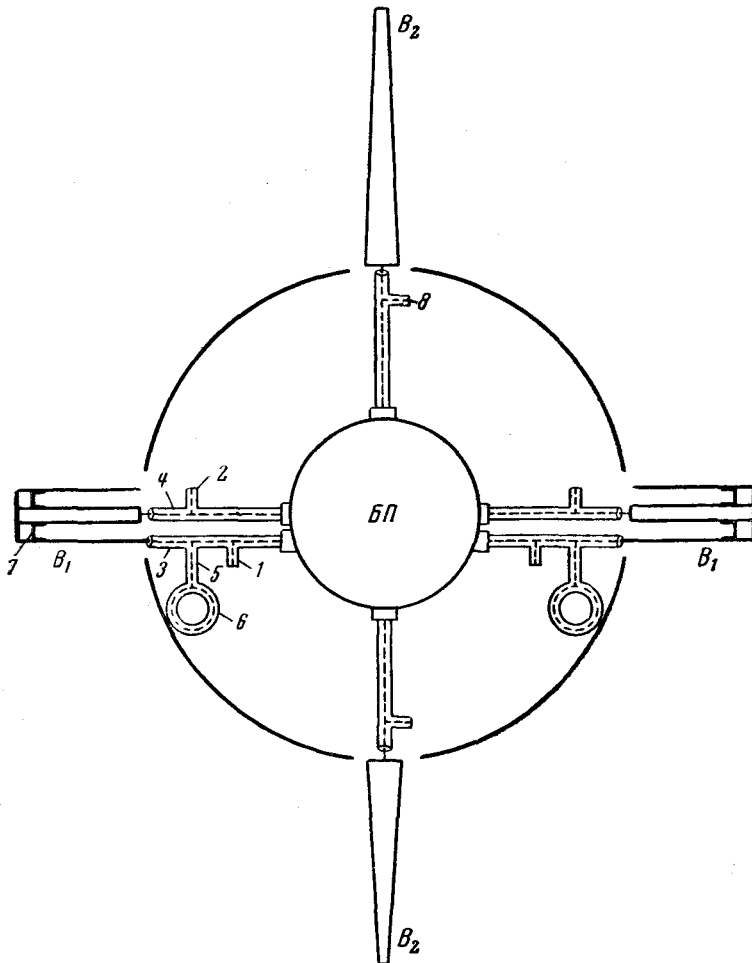


Рис. 3. Схема подключения бортовых антенн

БП — блок передатчиков; V_1 — плечи короткого вибратора (электрическая длина каждого плеча $1/4 \lambda_1$ и $1/12 \lambda_2$ для частот f_1 и f_2); V_2 — плечи длинного вибратора (электрическая длина каждого плеча $1/12 \lambda_3$); элементы настройки: 1, 2 и 8 — короткозамкнутые шлейфы; 3 и 4 — трансформаторы; 5 и 6 — отрезки кабелей, образующие фильтр; 7 — плавжер

Для устранения взаимного влияния при работе на общий вибратор выходы частот f_1 и f_2 блока передатчиков развязаны путем включения фильтров. Так, в цепь питания вибратора частотой f_1 включен фильтр, состоящий из двух отрезков кабелей 5 и 6, электрические длины которых $1/4 \lambda_1$ и $1/2 \lambda_1$, а волновые сопротивления равны 75 и 50 *ом* соответственно. Такая цепь (учитывая, что отрезок $1/2 \lambda_1$ замкнут сам на себя) эквивалентна последовательному соединению двух разомкнутых на конце отрезков

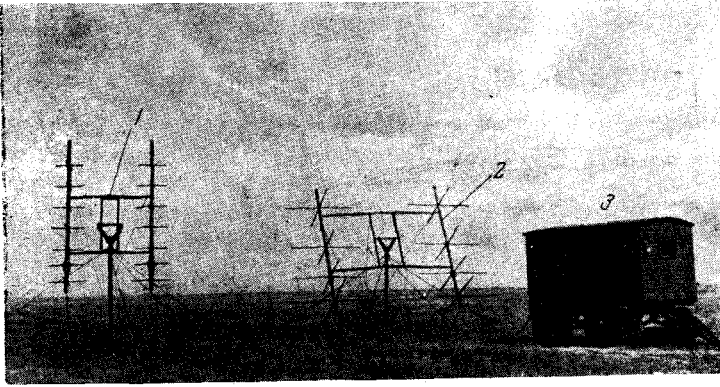


Рис. 4. Приемный пункт.

1 — приемная антенна для частоты f_1 ; 2 — приемная антенна для частоты f_2 ; 3 — аппаратный фургон

кабелей, электрическая длина которых $\frac{1}{4}\lambda_1$, а волновые сопротивления относятся как 1 : 3. Сопротивление этого фильтра на частоте f_1 бесконечно велико, а на частоте f_2 равно нулю. В цепь питания вибратора частотой f_2 последовательно включен отрезок коаксиальной линии, образованный внешними и внутренними трубками вибратора. Плунжерами 7 длина этих отрезков устанавливается равной $\frac{1}{4}\lambda_1$; таким образом, в цепь вносится большое сопротивление на частоте f_1 . Применение короткозамкнутых шлейфов и фильтров позволяет устранить влияние окружающих предметов на настройку.

На корпусе ракеты все антенны закреплены в одной плоскости, перпендикулярной продольной оси ракеты.

3. НАЗЕМНЫЕ ПРИЕМНЫЕ ПУНКТЫ

Прием излученных с борта ракеты сигналов, их преобразование и регистрация осуществляются на земле несколькими приемными пунктами, расположенными вблизи от проекции на землю вершины траектории ракеты. Общий вид приемного пункта показан на рис. 4.

Аппаратура приемного пункта позволяет:

а) производить радиоприем и измерение изменения разности фаз непрерывных колебаний с частотами f_1 , f_2 и f_3 (измеряется разность фаз между колебаниями с частотами f_1 и f_2 , а также f_1 и f_3);

б) производить измерение напряжений высокочастотных колебаний на входах приемных устройств (для уверенного приема и регистрации эти напряжения на входах приемников должны быть не менее 5 мкв);

в) записывать на кинолентку (шириной 35 мм) одновременно изменения разностей фаз двух пар принимаемых сигналов, напряжения этих сигналов на соответствующих входах приемного устройства, а также отметки времени (изменения разностей фаз и величины напряжений могут контролироваться визуально).

4. НАЗЕМНЫЕ ПРИЕМНЫЕ АНТЕННЫ

Каждое антенное устройство рассчитано на прием сигналов одной из частот f_1 , f_2 или f_3 и состоит из двух электрически независимых, но связанных конструктивно антенн, имеющих взаимноперпендикулярные

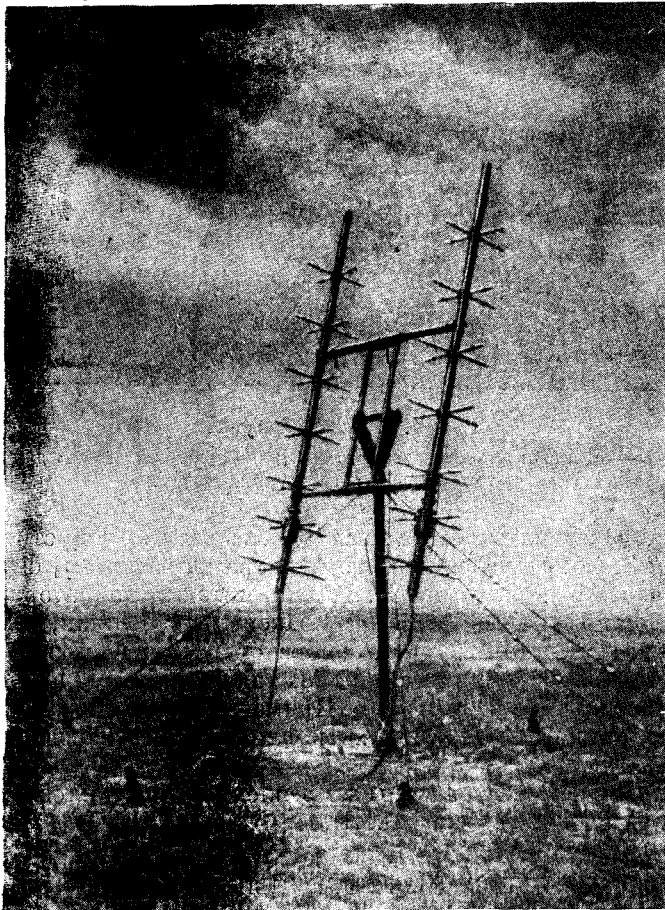


Рис. 5 Приемная антенна для частоты f_1

линейные поляризации. Сделано это для того, чтобы отделить поляризационные изменения уровней сигналов от изменений, которые могут происходить по иным причинам, а также для предотвращения потери информации из-за прекращения радиоприема во время «поляризационного нуля» для одной из антенн*. Антенна каждой поляризации присоединена к отдельному приемному устройству.

На рис. 4 видны антенные устройства для частот f_1 и f_2 , а на рис. 5 отдельно изображена антенна для частоты f_1 . Каждая антенна для приема сигналов одной поляризации состоит из двух синфазно возбуждаемых антенн типа «волновой канал», размещенных на двух «стрелах», причем на этих же «стрелах» размещаются и антенны для приема сигналов перпендикулярной поляризации. Антенна для приема сигналов с частотой f_1 имеет один рефлектор и пять директоров; антенна для приема сигналов с частотой f_2 имеет один рефлектор и два директора.

Антенное устройство для частоты f_3 состоит из четырех полуволновых вибраторов, подвешенных между четырьмя мачтами на высоте четверти

* «Поляризационные нули» для антенн с различной поляризацией сдвинуты во времени.

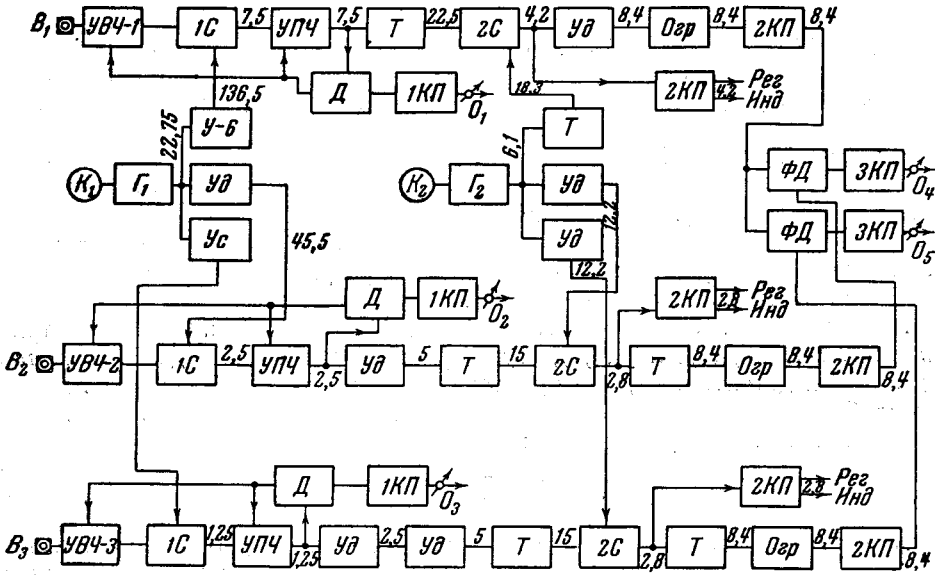


Рис. 6. Скелетная схема приемного устройства.

B_1, B_2, B_3 — входы для частот f_1, f_2 и f_3 соответственно; УВЧ-1, УВЧ-2 и УВЧ-3 — усилители на частоты f_1, f_2 и f_3 ; IC — первые смесители; УПЧ — усилители промежуточной частоты в каналах f_1, f_2, f_3 ; Д — детекторы автоматической регулировки усиления; 1КП — катодные повторители; O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 — стрелочные индикаторы и выходы на осциллограф МПО-2; Т — утроители; УД — удвоители; 2С — вторые смесители; G_1 — первый гетеродин ($f = 22,75$ МГц); G_2 — второй гетеродин ($f = 6,1$ МГц); K_1 — первый кварц ($f = 5,6875$ МГц); K_2 — второй кварц ($f = 3,05$ МГц); У-в — шестикратный умножитель; Ус — усилитель; Огр — ограничитель; 2КП — катодные повторители; 3КП — выходные катодные повторители; ФД — фазовые детекторы; Рег — выход на регистратор фигур Лиссажу; Инд — выход на индикатор визуального наблюдения; цифры на соединительных линиях указывают частоту колебаний (в МГц)

длины волны от земли. Высота подвеса вибраторов определяется требованиями формирования необходимой диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Параллельные вибраторы синфазны и используются для приема сигналов одной из поляризаций.

Характеристики приемных антенн:

а) для частоты f_1 ширина диаграммы направленности (по половинной мощности) в плоскости «стрел» равна 25° , в перпендикулярной плоскости — 35° ;

б) для частоты f_2 ширина диаграммы направленности в плоскости «стрел» — 35° , в перпендикулярной плоскости — 50° ;

в) для частоты f_3 диаграмма направленности имеет вид тела вращения, коэффициент направленного действия для влажной почвы $D = 4,9$; для сухого песка $D = 3,6$.

5. ПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО

Принятые антеннами сигналы поступают на приемное устройство. Скелетная схема его изображена на рис. 6. Приемное устройство является трехканальным супергетеродинным приемником, позволяющим производить одновременный прием и измерение изменений разностей фаз колебаний с частотами f_1, f_2 , и f_1, f_3 .

В каждом канале дважды производится преобразование частоты при помощи смесителей. Соответствующие гетеродинные напряжения образу-

ются умножением частоты двух, общих для трех каналов, гетеродинов, стабилизированных кварцами. Применение общих гетеродинов позволяет исключить из результатов фазовых измерений ошибки, вызываемые нестабильностью частот гетеродинов.

Частоты колебаний на выходе каждого из трех каналов одинаковы ($8,4 \text{ Мгц}$), что достигается соответствующим умножением частот в каналах f_2 и f_3 (в 3 и 6 раз). Кроме того, промежуточные частоты всех трех каналов умножаются дополнительно в 6 раз. При этом во столько же раз умножаются фазы промежуточных частот, в результате чего облегчаются измерения изменений разностей фаз.

Приведенные к одной частоте колебания на выходе каналов попарно складываются (f_1, f_2 и f_1, f_3), суммарные напряжения детектируются отдельными детекторами, в результате на выходе детекторов выделяются две огибающие сложенных колебаний (интерференционные частоты). Эти кривые описываются уравнением:

$$u = U \sqrt{1 + \cos \Delta\varphi}, \quad (3)$$

где u — суммарное напряжение на выходе детектора, U — напряжение на выходе детектора при детектировании напряжения на выходе одного из каналов (предполагается, что напряжения на выходах всех трех каналов равны); $\Delta\varphi$ — разность фаз складываемых колебаний.

Из выражения (3) следует, что при измерении изменений разности фаз этим методом необходимо постоянно и желателен равенство напряжений на выходах всех трех каналов. Для выполнения этого требования ряд каскадов работает в режиме ограничения и применена система автоматической регулировки усиления (АРУ).

Токи интерференционных частот после катодных повторителей поступают на регистрирующую аппаратуру. Таким образом производится измерение изменений разностей фаз принимаемых сигналов.

Кроме токов интерференционных частот от приемного устройства на регистрирующую аппаратуру поступают токи, зависящие от напряжений высокочастотных сигналов на входах приемного устройства. Эти токи поступают от катодных повторителей, на вход которых поданы напряжения АРУ.

Наличие в различных каналах приемного устройства промежуточных частот, относящихся как 2 : 3, позволяет использовать для измерения изменений разности фаз еще один способ: регистрацию перемещений характерных точек фигур Лиссажу [5]. Для этой цели из приемного устройства выведены напряжения соответствующих промежуточных частот, используемые для образования фигур Лиссажу на электронно-лучевых трубках.

Конструктивно блок приемного устройства состоит из четырех «линеек» (по одной «линейке» для каждого канала и одна «линейка» гетеродинов, детекторов и катодных повторителей). На лицевой панели расположены: высокочастотные штекеры для подключения кабелей от антенн, приборы для визуального наблюдения изменений разностей фаз и величин высокочастотных напряжений на входах приемного устройства, ручки потенциометров для регулировки напряжений на выходах каждого из трех каналов и другие органы управления и контроля.

Блок приемного устройства устанавливается в специальной стойке. Кроме него в стойке устанавливаются: выпрямитель для питания устройства, индикаторы для визуального контроля фигур Лиссажу, имитатор блока передатчиков для настройки и другие вспомогательные приборы.

В приемном устройстве применены пальчиковые лампы (6Ж1П, 6Ж2П, 6Ж4П, 6НЗП); в качестве детекторов используются германиевые диоды. Все усилители (в том числе и УВЧ) работают по обычным схемам с заземленным катодом.

Следует отметить некоторые электрические данные приемного устройства:

а) порог ограничения — наименьшее высокочастотное напряжение на входе какого-либо канала приемного устройства, при котором напряжение на выходе данного канала принимает значение, не изменяющееся практически при увеличении входного напряжения; для всех каналов порог ограничения не более 5 мкв;

б) рабочая полоса частот — полоса частот, в которой уменьшение напряжения данного канала на выходе детектора не превышает 5% от наибольшего значения в этой же полосе; рабочая полоса частот ΔF для каналов f_1 , f_2 и f_3 составляет 40, 25 и 15 кГц соответственно;

в) постоянная времени фазового детектора — $3 \cdot 10^{-4}$ сек; постоянная времени детектора АРУ — $3 \cdot 10^{-5}$ сек.

Некоторые сведения о фазовых характеристиках приемных устройств приведены в последнем разделе настоящей статьи.

6. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА

Запись результатов измерений производится на кинолентку (ширина 35 мм) двумя методами. Первый состоит в том, что при помощи шлейфового осциллографа МПО-2 записываются поступающие с выходов приемного устройства ток интерференционной частоты и токи, зависящие от напряжения на входах приемного устройства; одновременно записываются метки времени. Скорость движения пленки при записи — $100 \text{ мм} \cdot \text{сек}^{-1}$. Образцы записей показаны на рис. 7. На этих осциллограммах хорошо видна интерференционная кривая $i \sim \sqrt{1 + \cos \Delta\phi}$; расстояние между остриями кривой соответствует изменению разности фаз на 2π . Для расшифровки записей напряжений на входах приемного устройства производится калибровочная запись, при которой на входы подаются напряжения от генератора стандартных сигналов.

Ввиду того, что осциллографы МПО-2 рассчитаны на непрерывную запись не более 5 м пленки, их пришлось переделать, применив специальные кассеты. Переделанные осциллографы позволяют производить непрерывные записи (при скорости до $100 \text{ мм} \cdot \text{сек}^{-1}$) длиной до 300 м. На каждом приемном пункте одновременно производится запись на 4 осциллографах.

По записям интерференционной частоты производится определение при помощи выражения (1) распределения электронной концентрации по высоте. Для определенного момента времени t (отсчитываемого от старта ракеты) на пленке измеряется интервал времени Δt между двумя остриями интерференционной кривой (за этот интервал времени разность фаз изменяется на 2π)*. Из траекторных данных определяются значения скорости и высоты ракеты в момент времени t . Этих данных достаточно для вычислений n_e .

* Иногда удобнее измерять не интервал времени Δt , а некоторый интервал времени усреднения Δt_n , за который разность фаз изменяется на $2\pi q$ (где q — целое число).

$$\text{Тогда } \Delta t = \frac{\Delta t_n}{q}.$$

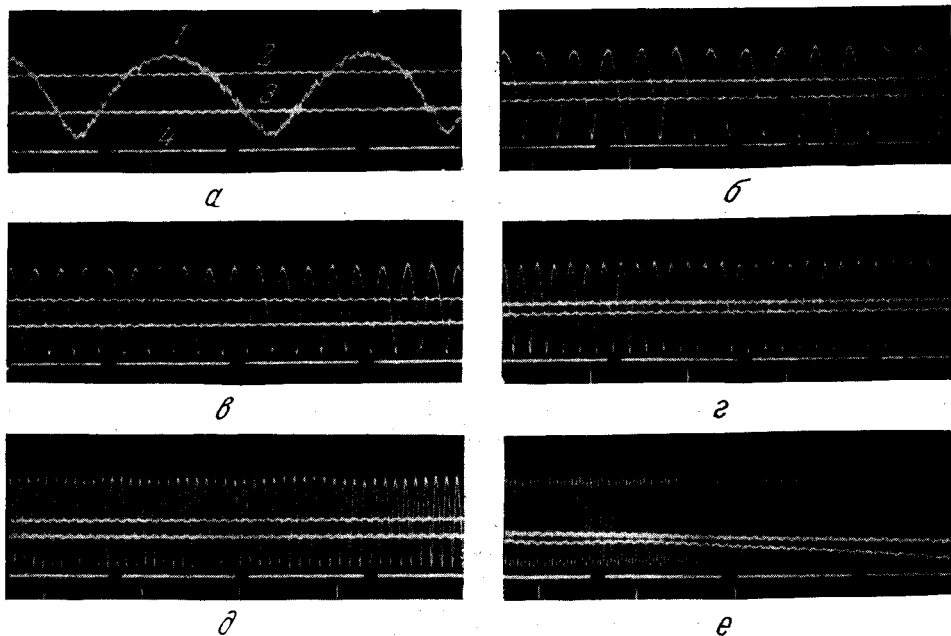


Рис. 7. Образцы записи на выходе приемного устройства дисперсионного интерферометра.

Приводимые осциллограммы *a* — *e* относятся к различным участкам траектории (различные скорости ракеты и различные электронные плотности); 1 — кривая разности фаз $\Delta\varphi$; 2, 3 — кривые напряжений на входах приемного устройства $U_{вх}$; 4 — метки времени (интервал 0,25 сек соответствует расстоянию от начала одной метки до начала другой)

По записям напряжений на входах приемных устройств производится определение средней электронной концентрации с использованием зависимости (2). Для этого по пленке измеряется интервал времени между двумя поляризационными минимумами («нулями»), что при наличии траекторных данных позволяет найти соответствующий интервал высот Δh , при прохождении которого плоскость поляризации повернулась на π .

Второй метод регистрации изменения разности фаз состоит в том, что на непрерывно движущуюся пленку записываются характерные точки фигуры Лиссажу, образованной на экране электронно-лучевой трубки напряжениями промежуточных частот, относящихся как 2 : 3 [5]. Фигуры, получающиеся при таком соотношении частот, показаны на рис. 8. При изменении фазы одного из напряжений фигура изменяется, причем точки пересечения линий фигуры остаются все время на одной прямой линии. Отношение отрезков x и y этой прямой (ограниченных точками пересечения линий фигуры Лиссажу) позволяет определять разность фаз колебаний, образовавших фигуру. Измерение изменений разности фаз упрощается, если определять их по моментам, когда фигура Лиссажу принимает предельные положения, т. е. когда сливаются две из трех точек. Для этих моментов разность фаз составляет $\varphi = \varphi_0 + \frac{\pi}{2}n$ (рис. 8, *e* и 8, *д*).

Устройство аппаратуры для записи характерных точек фигуры Лиссажу поясняется схемой рис. 9. Перед экраном электронно-лучевой трубки 1 помещается диафрагма 2 со щелью, позволяющей наблюдать только линию перемещения характерных точек. Видимая в щель часть фигуры проецируется фотообъективом 3 на непрерывно движущуюся кинопленку 4.

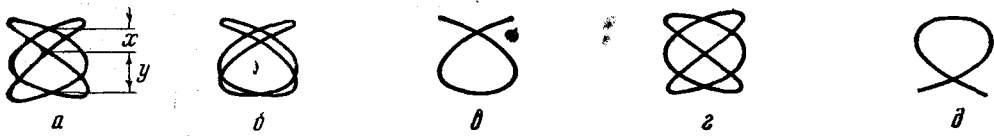


Рис. 8. Фигуры Лиссажу в случае, когда отношение частот равно 2:3, а разность фаз φ составляет:

$a - \varphi = 15^\circ$; $б - \varphi = 30^\circ$; $в - \varphi = 45^\circ$; $г - \varphi = 90^\circ$; $д - \varphi = 135^\circ$

В результате получается непрерывная запись характерных точек, из которой можно для любого момента времени определить разность фаз сигналов. Устройство содержит также усилители промежуточных частот 5 и 6,

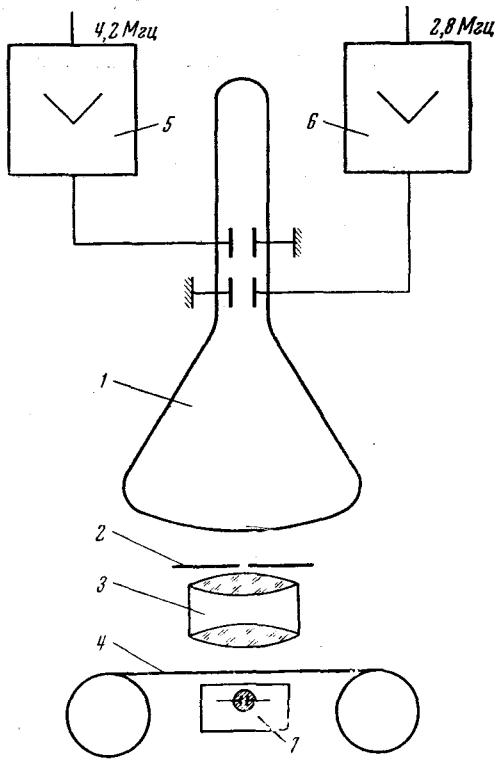


Рис. 9. Скелетная схема устройства для регистрации характерных точек фигур Лиссажу.

1 — электронно-лучевая трубка; 2 — щель; 3 — фотообъектив; 4 — киноплёнка; 5 и 6 — усилители промежуточных частот; 7 — устройство для записи меток времени

механизм протяжки пленки, схему для записи при помощи неоновой лампочки 7 на ту же пленку меток времени. Участок одной из записей приведен на рис. 10; видны кривые перемещений характерных точек и метки времени (метки подаются через 0,25 сек). Места пересечения двух линий соответствуют моментам совпадения двух характерных точек (предельные положения фигуры Лиссажу в и д на рис. 8). Изменение разности фаз

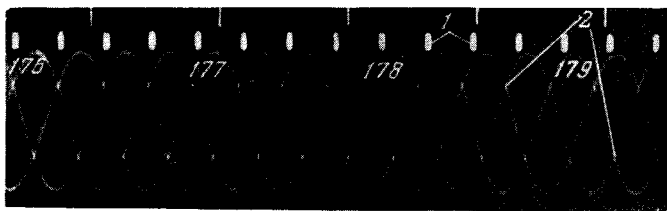


Рис. 10. Фотограмма изменений положения характерных точек фигур Лиссажу.

1 — метки времени; 2 — точки, соответствующие предельным положениям фигур Лиссажу

между двумя такими точками соответствует на более высокой частоте $1/2 \lambda$, на более низкой — $1/3 \lambda$.

Достоинством этого метода записи является его практическая безинерционность.

7. ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Для настройки аппаратуры дисперсионного интерферометра, для питания приемного устройства и для визуальных наблюдений во время работы разработаны специальные приборы, входящие в комплект аппаратуры дисперсионного интерферометра. Ниже приводятся краткие сведения о некоторых из них.

а) *Пульт контроля блока бортовых передатчиков.* При помощи этого прибора проверяются режимы блока передатчиков, а также измеряется мощность высокочастотных сигналов на выходах блока. Для измерения мощности используется фотометр.

б) *Генераторы для настройки антенн.* Эти генераторы позволяют получать высокочастотные колебания с частотами f_1 , f_2 и f_3 мощностью порядка нескольких *ватт*. Генераторы стабилизированы кварцами.

в) *Индикатор для визуального контроля изменения разности фаз принимаемых сигналов.* Прибор располагается в стойке приемного устройства. Изменение разности фаз определяется по изменениям фигуры Лиссажу на электронно-лучевой трубке. Промежуточные частоты, поступающие от приемного устройства, усиливаются однокаскадными усилителями.

г) *Имитатор блока передатчиков с фазовращателем.* Для настройки приемного устройства и проверки работы всей наземной аппаратуры используется имитатор блока передатчиков с фазовращателем. Имитатор вырабатывает высокочастотные сигналы с частотами f_1 , f_2 и f_3 путем умножения частоты общего задающего генератора, стабилизированного кварцем. Напряжения, создаваемые имитатором на входах приемного устройства, равны нескольким *милливольтам*.

Для проверки регистрирующей аппаратуры в имитаторе предусмотрена возможность изменения разности фаз сигналов. Это изменение осуществляется обычным *РС* — фазовращателем, включенным в канал f_1 . В результате последующего умножения частоты разность фаз на выходе приемного устройства может изменяться более, чем на 2π .

д) *Выпрямитель для питания приемного устройства.*

Выпрямитель питается от напряжения 220 в, 50 гц и обеспечивает стабилизированные напряжения питания анодных цепей и цепей смещения. Напряжение накала имеет ручную регулировку.

8. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ, ВНОСИМЫЕ АППАРАТУРОЙ

Аппаратурные погрешности являются составной частью погрешностей измерений методом дисперсионного интерферометра. Настоящий раздел содержит некоторые данные, характеризующие погрешности, вносимые аппаратурой. Оценка роли этих погрешностей в общих погрешностях измерений проводится в [4].

Одной из причин погрешности в определении изменений разности фаз высокочастотных колебаний является непостоянство (за период наблюдений) фазовых сдвигов, вносимых аппаратурой. Измеренное за время Δt_n изменение разности фаз $\Delta\Phi$ можно представить как сумму

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{ист}} + \Delta\Phi_{\text{погр}} = \Delta\Phi_{\text{ист}} + \Delta t_n \dot{\Phi}_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где $\Delta\Phi_{\text{ист}}$ — изменение разности фаз из-за дисперсии в ионосфере; $\Delta\Phi_{\text{погр}}$ — изменение разности фаз, обусловленное аппаратурой; $\dot{\Phi}_{\text{ср}}$ — средняя за время Δt_n скорость изменения разности фаз, определяемой аппаратурой.

Изменение разности фаз аппаратурного характера складывается из изменений фазовых сдвигов, вносимых отдельными приборами.

1. Ввиду малого числа резонансных контуров и стабильности режима блока передатчиков, а также на основании результатов исследования фазовых характеристик бортовых антенн можно считать, что изменения фазовых сдвигов, обусловленные блоком передатчиков и бортовыми антеннами, малы по сравнению с изменениями из-за нестабильности промежуточных частот и амплитуд принимаемых сигналов.

2. Изменениями фазовых сдвигов, создаваемыми наземными приемными антеннами, вполне можно пренебречь, если учесть малую скорость изменения угла прихода радиосигналов и достаточно широкую направленность этих антенн.

3. Изменения фазовых сдвигов в приемном устройстве могут возникать, в основном, в результате изменений промежуточных частот и вследствие изменений амплитуд принимаемых сигналов.

а) Изменения промежуточных частот происходят из-за изменений частот принимаемых сигналов и изменений частот гетеродинов. Скорость изменения первой промежуточной частоты канала f_1 , обусловленная нестабильностью частоты задающего генератора блока передатчиков и частоты первого гетеродина приемного устройства, на основании экспериментальных данных, не превышает $4 \text{ гц} \cdot \text{сек}^{-1}$. Скорость изменения этой же промежуточной частоты вследствие эффекта Доплера определяется изменением скорости ракеты, т. е. ускорением гравитационного поля Земли, и составляет примерно $5 \text{ гц} \cdot \text{сек}^{-1}$. Тогда, если отнести все изменения ко входу приемного устройства, то скорость изменения частоты можно считать равной $\dot{f}_1 = 9 \text{ гц} \cdot \text{сек}^{-1}$. Зная величину \dot{f}_1 , можно, пользуясь известными соотношениями для резонансных усилителей с одиночными контурами, подсчитать скорость изменения фазового сдвига для каждого каскада, беря соответствующие значения промежуточной частоты для каждого каскада и полагая добротности всех контуров $Q = 50$. Результирующая скорость изменения фазовых сдвигов для канала f_1 равна $\Delta\dot{\Phi}_1 = = 0,15 \text{ град} \cdot \text{сек}^{-1}$. Скорость изменения фазового сдвига для всех трех каналов приемного устройства примерно одинакова.

б) Изменения амплитуд принимаемых сигналов происходят во время полета ракеты, в основном, в результате поворота плоскости поляризации принимаемых радиоволн. Изменения амплитуд сигналов, в свою очередь,

могут вызывать изменения входных полных сопротивлений ламп (например, из-за изменения напряжения АРУ) и изменения формы анодного тока каскадов (ограничителей амплитуды, умножителей частоты). В результате изменяется общий фазовый сдвиг, вносимый всеми каскадами данного канала.

Количественные исследования влияния изменений амплитуд были произведены при помощи закороченной измерительной линии, использованной как не искажающий фазу аттенуатор*. Для описанных в настоящей

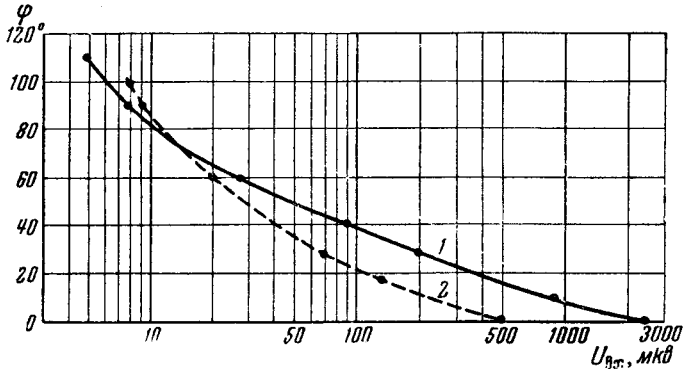


Рис. 11. Зависимость фазового сдвига от амплитуды высокочастотного сигнала на входе приемника:

1 — канал частоты f_1 ; 2 — канал частоты f_2 (фаза приведена к f_1)

статье приемных устройств получены зависимости изменения фазовых сдвигов от изменения величины высокочастотного сигнала на входе приемного устройства (рис. 11). Из приведенных кривых видно, что при изменении амплитуды сигнала на входе от 5 до 50 мкВ изменение фазы на выходе для канала f_1 достигает 2π (с учетом умножения в 6 раз).

в) В приемном устройстве возможны также изменения фазовых сдвигов из-за контуров каскадов УВЧ, вследствие температурных уходов настроек контуров и нестабильности питающих напряжений. Основываясь на имеющихся экспериментальных данных, можно считать, что эти изменения малы по сравнению с изменениями, обусловленными нестабильностью промежуточных частот и амплитуд принимаемых сигналов.

4. Регистрирующая аппаратура также вносит погрешность, связанную с неравномерной скоростью протяжки пленки лентопротяжными механизмами осциллографов МПО-2 и блоков записи характерных точек фигур Лиссажу. Погрешности регистрирующей аппаратуры сказываются не на измерении изменений разности фаз, а на определении интервала времени усреднения Δt_n , за который определяется изменение разности фаз. Так как абсолютная погрешность определения Δt_n не зависит от самой величины Δt_n , то увеличение времени усреднения уменьшает относительную погрешность. При интервале $\Delta t_n \approx 0,05$ сек ошибки определения Δt_n достигают 10%. Применяя интервалы $\Delta t_n \approx 0,2$ сек, можно считать, что погрешности, связанные с регистрирующей аппаратурой, не превышают $\pm 2\%$.

* Измерения проводили А. Н. Гридин и В. А. Рудаков. Применение закороченной линии предложено А. Н. Гридиным.

Некоторое представление о погрешностях, вносимых наземной аппаратурой, дает сравнение записей, полученных одновременно на различных приемных пунктах, удаленных друг от друга и имеющих автономное питание. Обычно расхождение результатов, полученных по этим записям, не превышает 5% от измеряемой величины.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К. И. Грингауз.¹ Докл. АН СССР, **120**, 1234, 1958; Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 1, изд-во АН СССР, 1958, стр. 62.
2. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков. Докл. АН СССР, **132**, 1311, 1960.
3. Сб. «Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности» под ред. Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. М.— Л., Гостехиздат, 1945.
4. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков. Сб. «Искусственные спутники Земли», настоящий выпуск, стр. 48.
5. Е. Я. Щеголев, К. Э. Виллер, И. М. Борушко. Статья в [3].

Дата поступления

2 апреля 1960 г.