

Физика

УДК 551.5

С. А. МХИТАРЯН, С. А. КОЧЕРОВ

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧАЮЩИХ СВОЙСТВ
АТМОСФЕРЫ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе описан микроволновой комплекс с встроенной микроЭВМ, обеспечивающий прецизионные измерения собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности. Показан принцип построения аппаратурного комплекса, приводятся схема калибровки и методика измерений излучающих свойств различных атмосферных и подстилающих поверхностей. Данные натурных измерений показали высокие технические характеристики микроволнового комплекса.

На современном этапе разработка дистанционных методов микроволновых измерений излучающих свойств атмосферы и подстилающей поверхности должна базироваться на использовании микроволновой аппаратуры, обладающей высокой чувствительностью и стабильностью работы. Только при помощи аппаратуры, позволяющей осуществить расчет радиояркой температуры непосредственно во время измерений, можно обеспечить широкое практическое использование СВЧ-радиометрической аппаратуры.

В работах [1—3] дано теоретическое обоснование возможности применения микроволновой радиометрии для определения рефракции микроволн в атмосфере, а также возможности определения скорости ветра и бальности волнения. При этом предполагается, что микроволновой комплекс должен обеспечить абсолютные измерения собственного теплового излучения атмосферы в широком диапазоне углов визирования [4, 5].

Для решения поставленных задач разработан модуляционный радиометр восьмимиллиметрового диапазона с параболическим зеркалом и рупорным облучателем. Для повышения абсолютной точности измерений радиометр строился по нулевой схеме с импульсной инъекцией шума в антенный тракт. Кроме того, в состав радиометра были введены встроенная микроЭВМ и система контроля кинетических температур элементов антенно-волноводного тракта, влияющих на результаты измерений. Значения кинетических температур учитывались в процессе предварительной обработки, которая проводилась до уровня антенных температур в темпе приема излучения.

Нулевой режим измерений был выбран вследствие таких его преимуществ, как пренебрежимо малая зависимость абсолютной ошибки измерений от флуктуаций коэффициента передачи радиометрического приемника, беспропускной режим наблюдений, пониженная флуктуационная ошибка. Наличие встроенной микроЭВМ позволило снять ограничения на сложность используемого алгоритма обработки сигнала.

Структурная схема радиометра приведена на рис. 1. Принимаемое антенной А тепловое излучение с температурной $T_A(t)$ через волновод-

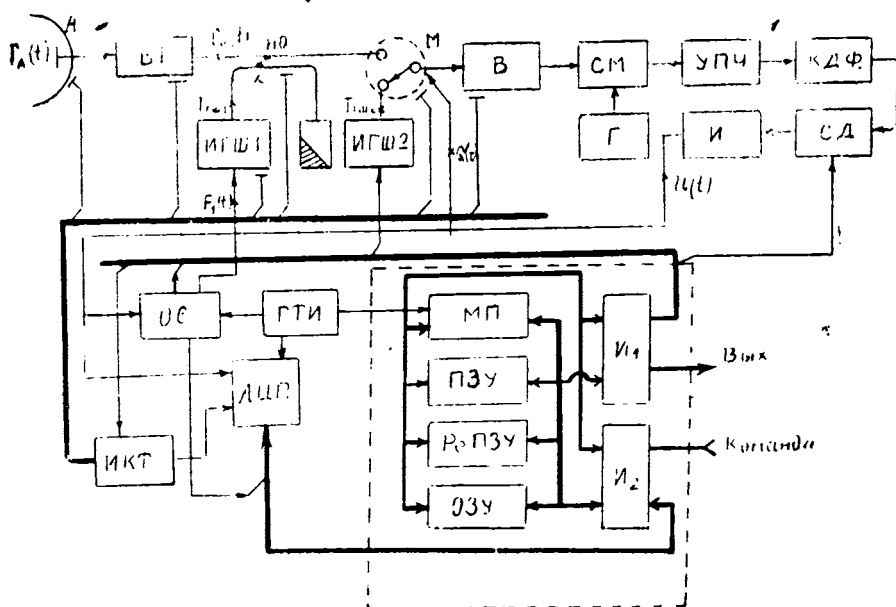


Рис. 1. Структурная схема нулевого радиометра.

ный тракт (ВТ) и направленный ответвитель (НО) поступает на сигнальный вход модулятора (М). В направленном ответвителе с коэффициентом передачи α к нему подмешивается излучение от импульсного генератора шума ИГШ₁, являющегося элементом цепи обратной связи нулевого радиометра. Опорный вход модулятора подключен к выходу второго импульсного генератора шума ИГШ₂, используемого для расширения динамического диапазона радиометра в сторону высоких значений температур.

Модулированный сигнал через вентиль (В) поступает на радиометрический приемник, содержащий последовательно соединенные смеситель (СМ) с гетеродином (Г), усилитель промежуточной частоты (УПЧ), квадратичный детектор с фильтром нижних частот (КДФ), синхронный детектор (СД) и интегратор (И).

Напряжение на выходе интегратора пропорционально разности температур на сигнальном и опорном входах модулятора. Оно поступает в схему обратной связи (ОС), которая управляет работой ИГШ₁ таким образом, чтобы напряжение интегратора $U(t)$ было по возможности ближе к нулю. Используется следующее правило (см. рис. 2): в момент t_i очередного переключения модулятора на опорный вход (момент смены периодов модуляции) ИГШ₁ включается на весь последующий период модуляции, если $U(t_i) < 0$, и остается выключенным, если $U(t_i) \geq 0$.

В результате работы ОС средние во времени значения температур на обоих входах модулятора становятся равными друг другу:

$$(1-\alpha)q_{\text{ВТ}}q_A \overline{T_A(t)} + (1-\alpha)q_{\text{ВТ}}(1-q_A)t_A^0 + (1-\alpha)(1-q_{\text{ВТ}})t_{\text{ВТ}}^0 + \alpha \overline{T_{\text{гш1}}(t)} = \overline{T_{\text{гш2}}(t)}. \quad (1)$$

Здесь q_A , $q_{\text{ВТ}}$ —затухания, а t_A^0 и $t_{\text{ВТ}}^0$ —кинетические температуры соответственно зеркала антенны и волноводного тракта. Текущие значения t_A^0 и $t_{\text{ВТ}}^0$ фиксируются введенной в состав радиометра системой измерения кинетических температур (ИКТ).

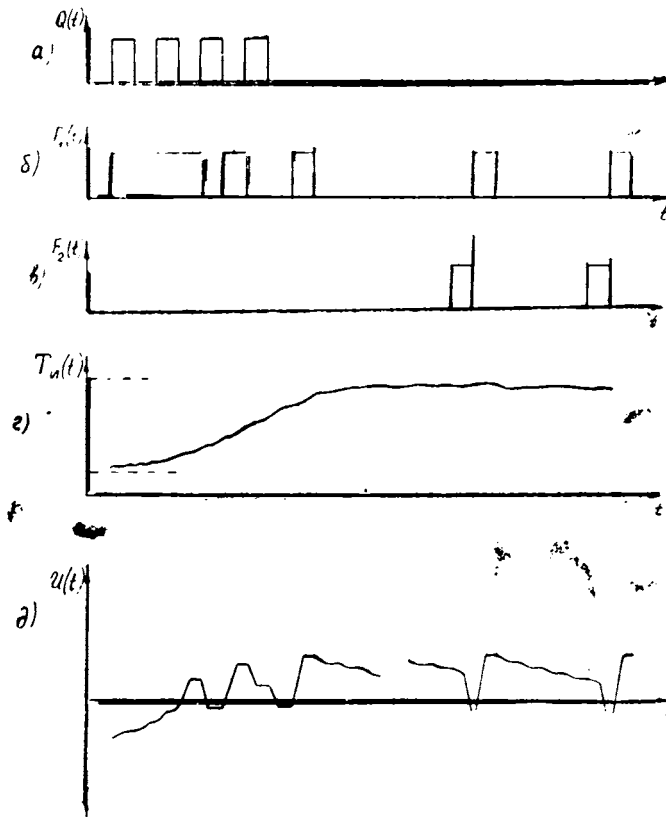


Рис. 2. Вид управляющих функций.

Управление всеми узлами радиометра и текущую обработку получаемых данных до уровня антенных температур осуществляет встроенная микроЭВМ, содержащая микропроцессор (МП), постоянное (ПЗУ), перепрограммируемое (РепЗУ) и оперативное (ОЗУ) запоминающие устройства. Связь микроЭВМ с узлами радиометра, внешним регистратором информации и оператором осуществляется через интерфейс вывода (I_1) и интерфейс ввода-вывода (I_2). Работая в режиме прерываний, микроЭВМ одновременно выполняет программу управления и программу обработки данных, которые поступают из схемы обратной связи (ОС), с выхода интегратора (И) и из измерителя кинетических температур (ИКТ) через аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Синхронизируются отдельные узлы радиометра генератором тактовых импульсов (ГТИ) и микроЭВМ по шине управления через I_1 . Генератор шума ИГШ₁ управляется схемой обратной связи (ОС), а ИГШ₂-микроЭВМ посредством дискретных управляющих функций $F_1(t)$ и $F_2(t)$, которые изменяют свои значения в моменты $\{t_i\}$ на отрицательных фронтах функции управления модулятором $Q(t)$.

При этом температуры на выходах генераторов шума будут

$$\begin{cases} T_{гш1}(t) = T_{L1} + \Delta T_{гш1} F_1(t), \\ T_{гш2}(t) = T_{L2} + \Delta T_{гш2} F_2(t), \end{cases} \quad (2)$$

где T_{L1} и T_{L2} — температуры выключенных ИГШ, а $\Delta T_{гш1}$ и $\Delta T_{гш2}$ — перепады температур при их включении.

В конце каждого периода модуляции на время τ_ϕ генераторы шума выключаются. Производится искусственное разделение рядом стоящих импульсов инжекции. Это необходимо для выравнивания вклада

отдельных импульсов в общую инжектируемую температуру независимо от их взаимного расположения. Величина τ_ϕ мала, и, пренебрегая ею в соответствии с указанным правилом формирования $F_1(t)$, можем записать

$$F_1(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } U(t_i) \leq 0, \\ 0, & \text{если } U(t_i) > 0, \end{cases}$$

где $t_i < t < t_{i+1}$.

Вид управляющих функций $Q(t)$, $F_1(t)$ и $F_2(t)$ представлен на рис. 2а, б, в.

Из (2) следует, что

$$\overline{T_{гш1}(t)} = T_{L1} + \Delta T_{гш1} \overline{F_1(t)} = T_{L1} + \Delta T_{гш1} \left(\frac{N_1}{N_0} + \frac{U(t_k) - U(t_n)}{N_0 \Delta U_0} \right), \quad (3)$$

где N_1 — число импульсов инжекции на интервале наблюдения $[t_n, t_k]$, содержащем N_0 периодов модуляции, а ΔU_0 — диапазон измерения напряжения интегратора в отсутствие шума при постоянном значении измеряемой температуры.

Величина ΔU_0 линейно связана с коэффициентом передачи радиометрического приемника и является величиной изменчивой. По этой причине производится регулярное вычисление ее текущих значений по измеренным с помощью АЦП значениям напряжения интегратора в моменты t_i . Вычисления производятся для интервалов времени $[t_{n\Omega}, t_{k\Omega}]$, у которых $F_2 = \text{const}$ по формуле

$$\Delta U_0 = \frac{N_{0\Omega}}{N_{1\Omega}(N_{0\Omega} - N_{1\Omega})} \left[\sum_{i \in \Omega^-} U(t_i) - \sum_{i \in \Omega^+} U(t_i) \right] - \frac{U(t_{k\Omega}) - U(t_{n\Omega})}{N_{0\Omega} - N_{1\Omega}}. \quad (4)$$

Здесь Ω^- и Ω^+ представляют собой множество значений i , принадлежащих интервалу $[t_{n\Omega}, t_{k\Omega}]$ (включая его начало и конец) и обозначающих моменты времени, в которых $F_1(t)$ соответственно увеличивает или уменьшает свое значение в предположении, что за пределами интервала $[t_{n\Omega}, t_{k\Omega}]$ выполняется

$$F_1(t) = 0.$$

В соответствии с (1) — (4) для среднего на интервале наблюдения $[t_n, t_k]$ значения антенной температуры $\overline{T_A(t_n, t_k)}$ справедливо

$$\overline{T_A(t_n, t_k)} = \frac{1}{(1-\alpha)q_A q_{BT}} \left[(T_{L1} - \alpha T_{L2}) + \Delta T_{гш2} \frac{N_2}{N_0} - \alpha \Delta T_{гш1} \left(\frac{N_1}{N_0} + \frac{U(t_k) - U(t_n)}{N_0 \Delta U_0} \right) \right] - \frac{1 - q_{BT}}{q_A q_{BT}} t_{BT}^0 - \frac{1 - q_A}{q_A} t_A^0. \quad (5)$$

Границы динамического диапазона антенных температур T_{Amin} и T_{Amax} в пренебрежении поправочными членами с кинетическими температурами t_A^0 и t_{BT}^0 задаются выражениями

$$T_{Amin} = \frac{T_{L1} - \alpha T_{L2} - \alpha \Delta T_{гш1}}{(1-\alpha)q_{BT}q_A}, \quad (6)$$

$$T_{Amax} = \frac{T_{L1} - \alpha T_{L2} + \Delta T_{гш2}}{(1-\alpha)q_{BT}q_A} \quad (7)$$

В основном значения $T_{\text{Аmin}}$ и $T_{\text{Аmax}}$ определяются величинами T_{L1} , $\alpha\Delta T_{\text{гш1}}$ и $\Delta T_{\text{гш2}}$.

Ошибка измерения содержит систематическую, вызванную точностью оценок истинных значений температур T_{L1} , T_{L2} , $\Delta T_{\text{гш1}}$, $\Delta T_{\text{гш2}}$, $\xi_{\text{т}}$, $t_{\text{А}}$ и затуханий $q_{\text{А}}$, $q_{\text{вт}}$, α , а также вызванную шумами, случайную составляющую, входящую через величины $U(t_k)$, $U(t_n)$, ΔU_0 , N_1 и N_2 . Подробное исследование случайной ошибки показало, что на границах динамического диапазона резко возрастают ошибки определения ΔU_0 и дисперсия напряжения интегратора, что ужесточает требования к точности АЦП. По этой причине в радиометре динамический диапазон установлен с некоторой избыточностью ($\sim 20\%$) по отношению к рабочему диапазону, лежащему в пределах от 50°K до 300°K .

Работает микроЭВМ в режиме прерываний, выполняя одновременно основную программу вычисления и прерывающую программу управления.

В функцию основной программы входят:

- вычисление антенной температуры по данным, полученным на предыдущем интервале наблюдения;
- измерения кинетических температур СВЧ-элементов;
- проведение коррекции значений величин T_{L1} , T_{L2} , $\Delta T_{\text{гш1}}$, $\Delta T_{\text{гш2}}$, $q_{\text{А}}$, $q_{\text{вт}}$ и α по табулированным в ПЗУ зависимостям и таблицам.

В функцию программы управления входят:

- установка границ интервала наблюдения $[t_n, t_k]$ и интервала $[t_{\text{нГ}}, t_{\text{кГ}}]$ измерения ΔU_0 ;
- фиксация чисел N_1 , N_2 , N_{10} ;
- управление ИГШ₂, устроенное так, чтобы напряжение интегратора не выходило за пределы динамического диапазона АЦП.

Выполнена микроЭВМ на основе микропроцессорного комплекта 580 серии с использованием элементов памяти 556 и 565 серий. Аналого-цифровой преобразователь монокристаллический (К572ПВ1). Смеситель сделан по балансной схеме на диодах с барьером Шоттки АД521А.

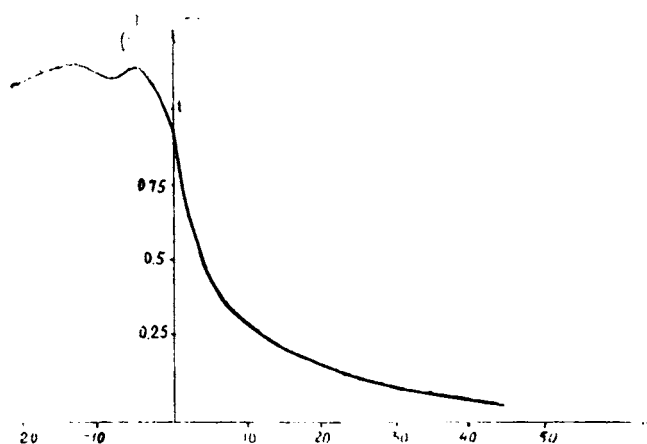


Рис. 3. Зависимость радиояростной температуры от угла визирования.

В качестве гетеродина используется генератор Ганна, а в качестве генераторов шума лавинно-пролетные диоды. Модулятор собран на р-і-п диодах.

Конструктивно радиометр оформлен в виде трех блоков: СВЧ-блока, НЧ-блока и пульта контроля. СВЧ-блок содержит в себе все СВЧ-элементы и УПЧ с КДФ. Он прикреплен общим крепежом к антенне.

Низкочастотный блок содержит преобразователь питающего напряжения, микроЭВМ и тракты аналоговой обработки сигнала. На пульте контроля расположены органы управления, визуального контроля и регистрации.

В результате принятых мер абсолютная точность измерений при беспрерывном режиме наблюдений составляет порядка $1,2^\circ\text{K}$. В основном она определяется точностью поддержания заданной шумовой температуры ИГШ₁ и ИГШ₂. При этом флуктуационная чувствительность на односекундном интервале наблюдения не хуже $0,4^\circ\text{K}$. Потребляемая радиометром мощность не превышает 25 Вт.

Испытания аппаратного комплекса проводились в течение осени 1985 г. в районе оз. Севан. Радиометр СВЧ устанавливался на поворачиваемом устройстве с дистанционным управлением по углу места и азимуту. Методика измерений сводилась к получению вертикальных разрезов, т. е. угловой зависимости радиоярких температур, причем угол визирования изменялся в интервале -20° , $+90^\circ$. При угле 90° проходила текущая калибровка по опорной плите, температура которой контролировалась. В диапазоне угла места (0° , 60°) определялся уровень собственного теплового излучения атмосферы, а в диапазоне (-20° , 0°) — излучение водной поверхности оз. Севан. Измерения проводились при разных погодных условиях и разных бальностях волнения. На рис. 3 приведены данные длительных измерений радиояркой температуры атмосферы при стабильных метеоусловиях. Эти данные показывают, что максимальная погрешность не превышает 10°K . На рис. 4 приведен вертикальный разрез, показывающий зависимость уровня собственного теплового излучения от угла визирования для вертикальной составляющей излучения.

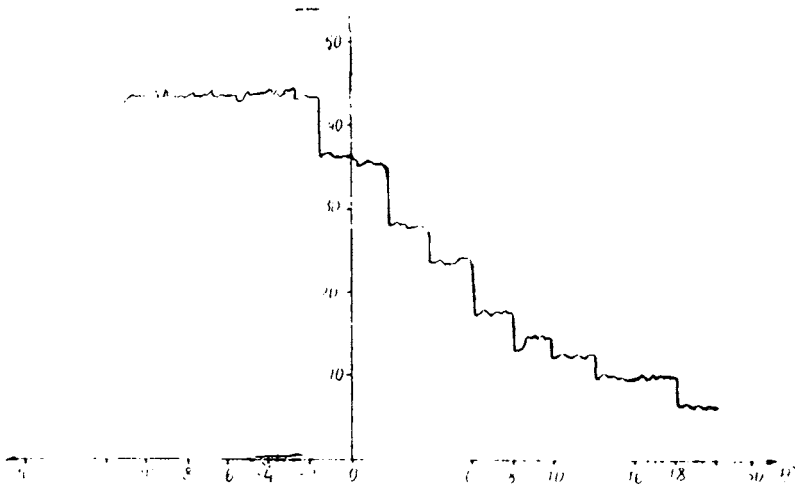


Рис. 4. Пример вертикального разреза, показывающий зависимость уровня теплового излучения от угла визирования.

Описание результатов измерений и их анализ выходят за рамки настоящей статьи.

Авторы выражают признательность профессору А. Г. Горелику и доценту Ж. Б. Хачатрянцу за постановку задач и за те обсуждения, которые способствовали выполнению данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лагунов В. Ф., Сидаренко Е. С., Хачатрян Ж. Б. Изучение структуры полей метеосигналов при помощи сканирующих радиометрических систем. Взаимодействие излучения с веществом. М.: Связь, 1972, с. 28—33.
2. Павельев А. Г. к решению обратной задачи рефракции.—Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 12, с. 2500—2504.
3. Хачатрян Ж. Б., Мхитарян С. А. Требования к СВЧ-аппаратуре влажного зондирования атмосферы в горных районах Армении.—Уч. записки ЕГУ, 1984, № 3.
4. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосфере Земли, Венеры, Марса. М.: Сов. радио, 1976, с. 219.
5. Горелик А. Г., Хачатрян Ж. Б., Пенязь Л. А. СВЧ-поляризационные исследования системы атмосфера—поверхность океана в широком диапазоне углов визирования углов.—Метеорология и гидрология, 1986 (в печати).

Ս. Ա. ՄԻԻՔԱՐՅԱՆ, Ս. Ա. ԿՈՉԵՐՈՎ

**ՄԹՆՈՒՈՐՏԻ ԵՎ ԶՐԱՅԻՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅՔԻ ԸԱՌԱԳԱՑՔՈՂ
ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՍԱՐՔԱՎՈՐՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄ**

Ա մ փ ո փ ո մ

Ներկայացված է մթնոլորտի և ենթածածկող մակերևույթի ճառագայթման ճշգրիտ չափման համար նախատեսված միկրոալիքային համակարգ, որը դեկավարվում է ներսարված միկրո-էՀՄ-ի միջոցով: Նկարագրվում է սարքավորման կառուցման սկզբունքը: Բերված է աստիճանավորման և տարբեր տեսակի մթնոլորտային ու ենթածածկող մակերևույթների ճառագայթման հատկությունների չափման եղանակները: Դաշտային պայմաններում կատարված չափումները ցույց են տվել համակարգի բարձր արդյունավետությունը: