

В. А. Кабанов*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: kabanov@ire.kharkov.ua

РАДИОМЕТР ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ТОЧНОЙ КАЛИБРОВКОЙ ПО ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ НЕБА

Методы пассивного зондирования атмосферы в СВЧ-диапазоне являются одним из актуальных направлений дистанционного зондирования окружающей среды. Важной задачей остается разработка простых и экономичных технических решений и методик радиометрических измерений. Представлена простая мобильная радиометрическая система 3-см диапазона волн, предназначенная для метеорологических исследований. Радиометр выполнен по модуляционной схеме с некоторыми особенностями построения входных элементов и проведения калибровки. Предложен способ точного определения яркостной температуры неба, используемой для калибровки радиометрической системы. Реализован вариант построения радиометра с применением спутникового конвертера. Ил. 9. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: яркостная температура, радиометр, аттенуатор, калибровка.

Методы пассивного зондирования атмосферы в СВЧ-диапазоне позволяют получать информацию о температуре и влажности атмосферы, водности облаков и осадках. Полученная информация может быть использована для прогноза погоды, опасных метеорологических явлений, а также для решения задач экологии, гидрологии и природопользования, что является одним из актуальных направлений дистанционного зондирования окружающей среды [1, 2].

Важной задачей, связанной с использованием данных дистанционного зондирования атмосферы и метеообразований, остается разработка простых и экономичных технических решений и методик радиометрических СВЧ-измерений.

При выполнении НИР «Зонд» возникла необходимость в создании простой радиометрической системы трехсантиметрового диапазона волн, которая может использоваться в стационарных и экспедиционных условиях.

Система, предназначенная для дистанционного зондирования атмосферы, включает в себя антенну, радиометрический приемник и регистрирующее устройство. Антенна обеспечивает пространственную селекцию принимаемого потока излучения, интенсивность которого определяется яркостной температурой исследуемых объектов $T_{я}$ и формирует так называемую антенную температуру $T_{яа}$. Последующие элементы обеспечивают измерение $T_{яа}$.

1. Антенна. Для радиометрических измерений параметров атмосферы и метеообразований не требуется очень узкая диаграмма направленности и высокая точность наведения антенны на объект наблюдения ввиду его протяженных размеров. Основное требование к антенной системе – слабое рассеяние, особенно в задней полусфере, и высокий КПД. Для этих целей может

быть использована оптимальная рупорная антенна. Несмотря на то, что такая антенна имеет высокий уровень первых боковых лепестков в плоскости E (-13 дБ), в подобных измерениях они почти всегда направлены, так же как и главный лепесток, на объект наблюдения и поэтому не искажают результаты измерений.

Наиболее удачным вариантом является рупорно-параболическая антенна, у которой существенно ниже уровень боковых лепестков, практически отсутствует задний лепесток, а КПД близок к 1.

В предлагаемой радиометрической системе использовались оба варианта антенн.

Параметры оптимальной рупорной антенны: раскрыт 260×220 мм; ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в плоскости $E \sim 7^\circ$, в плоскости $H \sim 9^\circ$.

У рупорно-параболической антенны, выполненной на базе оптимальной рупорной антенны, ширина диаграммы в плоскости $E \sim 6^\circ$, в плоскости $H \sim 8^\circ$. Благодаря конструктивным особенностям и слабому рассеянию рупорно-параболическая антенна позволила совместить работу радиометра и метеолокатора.

2. Радиометрический приемник. Основной частью радиотеплолокационной системы является радиометрический приемник (радиометр). Существуют различные схемы построения радиометров: компенсационная, модуляционная, корреляционная, аддитивно-шумовая [3, 4].

В нашем случае была использована модуляционная схема с усилителем высокой частоты (УВЧ) и некоторыми особенностями построения входных элементов и проведения калибровки.

Структурная схема радиометра приведена на рис. 1. Основная особенность схемы состоит в том, что на входе радиометра непосредст-

венно перед антенной расположен дистанционно-управляемый аттенуатор. Максимальное ослабление аттенуатора превышает 30 дБ, поэтому в закрытом положении он представляет собой согласованную нагрузку. Поскольку максимальная яркостная температура окружающих объектов составляет около 300 К, то влияние внешних факторов, ослабленных более чем на 30 дБ, можно не учитывать.

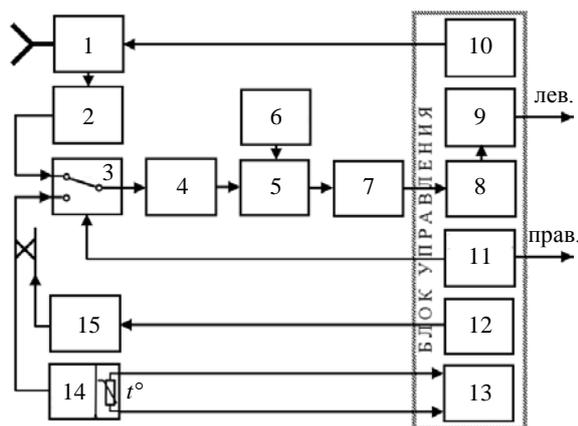


Рис. 1. Структурная схема радиометра: 1 – дистанционно-управляемый аттенуатор; 2 – развязывающий вентиль; 3 – модулятор; 4 – СВЧ-усилитель; 5 – СВЧ-смеситель; 6 – гетеродин; 7 – предварительный усилитель промежуточной частоты; 8 – усилитель промежуточной частоты; 9 – квадратичный детектор; 10 – переключатель состояния аттенуатора; 11 – генератор модуляционной частоты; 12 – блок питания генератора шума; 13 – термометр; 14 – опорная нагрузка с датчиком температуры; 15 – генератор шума

Через развязывающий вентиль аттенуатор соединен с одним из входов модулятора. Второй вход модулятора соединен с опорной нагрузкой. На этот же вход может подмешиваться калибровочный сигнал от генератора шума. Управляющий сигнал подается на модулятор от генератора модуляционной частоты, расположенного в блоке управления.

Установленный в тракте вентиль вносит некоторое дополнительное затухание, что приводит к увеличению шумовой температуры приемника, но он существенно улучшает согласование в канале и упрощает работу радиометра с различными антеннами и другими устройствами, подключаемыми к входу радиометра. Если предполагается использовать радиометр только с одной антенной, то вентиль можно исключить.

С выхода модулятора сигнал поступает на вход СВЧ-усилителя и после усиления – на СВЧ-смеситель. Сюда же подается сигнал гетеродина, выполненного на диоде Ганна. С выхода смесителя сигнал через предварительный усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ) поступает в блок управления на основной усилитель про-

межуточной частоты (УПЧ), который совмещен с аттенуатором и имеет плавную регулировку усиления в небольшом диапазоне, необходимую для оперативной калибровки радиометра.

На выходе УПЧ установлен квадратичный детектор, с выхода которого сигнал подается на левый канал звуковой платы компьютера. На правый канал звуковой платы поступает сигнал от генератора модуляционной частоты. Такая схема подключения не требует специальных АЦП и, следовательно, может использоваться практически с любым компьютером. Частота модуляции составляет около 20 Гц.

Последующая цифровая обработка сигнала (выделение модуляционной частоты, синхронное детектирование, масштабирование и калибровка) осуществляется в компьютере с помощью программы *PowerGraph* в реальном масштабе времени. В конечном итоге на экран выводятся измеряемые значения яркостной температуры. Дальнейшая обработка результатов измерений может быть выполнена с помощью той же программы, имеющей большой набор инструментов. Таким образом, данная программа обеспечивает функционирование радиометрической системы и наглядное представление результатов измерений в реальном масштабе времени.

Интерфейс рабочей станции, соответствующий процессу калибровки радиометра, представлен на рис. 2.

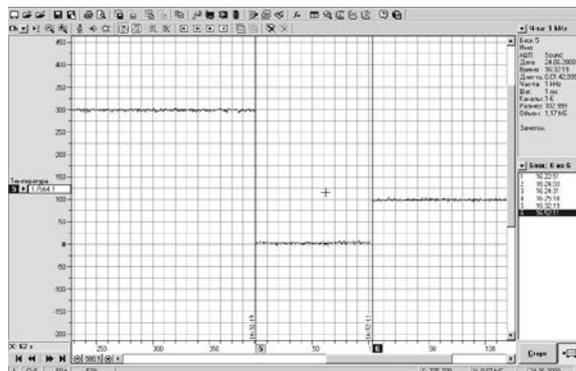


Рис. 2. Интерфейс программы регистрации радиометрических измерений

Радиометрический приемник может работать в режиме измерений (рабочий режим) и в режиме калибровки.

При открытом аттенуаторе на входе радиометра (рабочий режим) модулятор переключает с частотой модулирующего напряжения вход СВЧ-усилителя с выхода антенны на выход опорного источника шума, в качестве которого используется согласованная нагрузка. Поэтому модулированный сигнал несет информацию об

отличии измеряемой яркостной температуры от температуры опорной нагрузки.

При закрытом аттенюаторе (режим калибровки) переключение входа СВЧ-усилителя происходит между двумя согласованными нагрузками с одинаковой температурой. В канал опорной нагрузки может подаваться сигнал внутреннего калибровочного генератора. Калибровочный сигнал подается на другое (по сравнению с полезным сигналом) плечо модулятора, что приводит к уменьшению выходного сигнала. Это позволяет калибровать шкалу радиометра в области малых значений яркостной температуры.

При настройке и регулировке прибора удобно использовать внешний калибровочный генератор шумов. Учитывая небольшой диапазон возможных значений яркостных температур, был реализован (как наиболее простой и точный) генератор калибровочных шумов на базе нагреваемой поглощающей нагрузки. Яркостная температура такой нагрузки равна ее термодинамической температуре и легко может быть измерена с необходимой точностью.

Конструктивно радиометрический приемник выполнен в виде двух отдельных блоков, соединенных между собой кабелем. В первом блоке расположены все СВЧ-узлы прибора и ПУПЧ.

Во втором блоке находятся УПЧ, квадратичный детектор, генератор модулирующего сигнала, цифровой термометр (температурный датчик которого вмонтирован в корпус опорной нагрузки) и стабилизированные источники питания всех устройств радиометра. Этот блок одновременно служит для управления работой радиометра. На передней панели расположены ручки регулировки усиления, переключатели режимов работы, а также цифровое табло термометра.

Питание радиометра осуществляется от сети 220 В или автономного источника 12...16 В.

При питании от аккумуляторов и использовании ноутбука радиометрический комплекс становится полностью автономным и может использоваться в полевых условиях. Параметры радиометра приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры радиометра

Параметр	Значение
Рабочая частота, ГГц	10
Полоса частот радиометра, МГц	30
Флуктуационная чувствительность, К (при полосе фильтра на выходе 1 Гц)	1...2

Внешний вид СВЧ-блока и рупорной антенны приведен на рис. 3, а блок управления в составе рабочего места оператора – на рис. 4. Расположение радиометра с рупорно-параболи-

ческой антенной на метеолокаторе МРЛ-1 представлено на рис. 5.



Рис. 3. СВЧ-блок радиометра с рупорной антенной

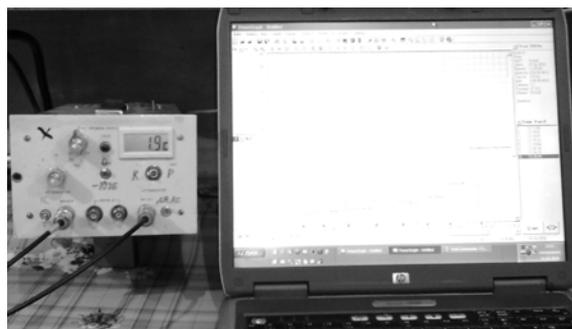


Рис. 4. Блок управления в составе рабочего места оператора

3. Калибровка радиометрической системы. Радиометры могут иметь высокую флуктуационную чувствительность, однако нестабильность коэффициентов усиления и ряда других параметров приводит к медленному дрейфу выходного сигнала и, следовательно, к ошибкам в определении $T_{я}$. Для устранения этих ошибок необходимо периодически проводить калибровку всей системы.



Рис. 5. Расположение СВЧ-блока радиометра с рупорно-параболической антенной на МРЛ-1

Калибровка радиометрической системы может выполняться поэлементно: отдельно для антенны и для радиометрического приемника. Однако наиболее эффективным методом является внешняя калибровка, так как она учитывает влияние всех возможных факторов на результаты измерений.

В общем случае для реализации качественной калибровки радиометрической системы необходимо иметь набор эталонных излучающих элементов с известной яркостной температурой, перекрывающих весь диапазон ее возможного изменения для исследуемых объектов. Эти элементы должны быть расположены в дальней зоне антенны и иметь размеры, превышающие размеры пятна главного лепестка диаграммы направленности антенны. Примером такого элемента с известным значением $T_{\text{я}}$ может служить ясное небо [4, 5]. На практике этот идеальный метод калибровки трудно реализуем в связи с тем, что кроме температуры ясного неба трудно найти или организовать другие эталонные элементы с различными $T_{\text{я}}$.

Если учесть, что в радиометеорологии яркостная температура объектов изменяется в сравнительно небольших пределах и квадратичное детектирование приводит к линейной зависимости выходного сигнала от $T_{\text{яа}}$, то для калибровки радиометрической системы достаточно использовать всего два эталонных источника, $T_{\text{я}}$ которых расположены вблизи границ указанного диапазона. В большинстве случаев можно обойтись одним эталонным элементом для внешней

калибровки и одним элементом в виде эталонной нагрузки для калибровки только радиометрического приемника.

Предлагается следующая методика калибровки радиометрической системы. Расположенный на входе радиометра дистанционно управляемый аттенуатор в закрытом положении представляет собой согласованную нагрузку. В режиме калибровки (аттенуатор закрыт) модулятор переключает вход СВЧ-усилителя между двумя согласованными нагрузками, находящимися при одинаковой температуре. В этом случае сигнал на выходе радиометра должен быть близок к нулю. Если этому случаю на шкале $T_{\text{я}}$ присвоить значение, равное термодинамической температуре нагрузок, то мы получим одну из необходимых точек калибровки, относительно которой будут происходить изменения $T_{\text{ян}}$ на входе радиометра. Таким образом, показания радиометра в режиме калибровки должны быть равны термодинамической температуре нагрузок, контролируемой специальным цифровым термометром, датчик которого вмонтирован в корпус опорной нагрузки.

В рабочем режиме (аттенуатор открыт) модулятор переключает вход УВЧ между антенной и опорной нагрузкой с известной температурой. Поэтому второй опорной точкой шкалы радиометра вполне может служить температура неба в зените $T_{\text{ян}}$ (угол места $\theta = 90^\circ$), которая на нашей частоте равна около $8 \dots 10$ К и находится с другой стороны возможного диапазона изменений $T_{\text{яа}}$.

Согласно [3] яркостная температура неба в зените даже при дожде интенсивностью 4 мм/час мало отличается от температуры ясного неба. Похожие результаты получены автором в результате многочисленных измерений в разные сезоны и при различных метеоусловиях (в том числе наличии умеренной облачности и слабого дождя). Эти измерения показали относительную стабильность $T_{\text{ян}}(90^\circ)$. Так, при минимальном значении, равном 6,5 К, среднее значение (если исключить случаи сильных аномалий, например таких, как ливневые дожди) оказалось равным 9,3 К. Результаты измерений иллюстрируются графиком, изображенным на рис. 6, где показан массив зависимостей $T_{\text{ян}}(\theta)$ от горизонта до зенита.

Таким образом, использование для калибровки радиометра значения $T_{\text{ян}}(90^\circ)$ около 9 К, в большинстве случаев (кроме резко аномальных) дает погрешность калибровки $2 \dots 3$ К. При сплошной плотной облачности достоверность такой калибровки вызывает сомнения.

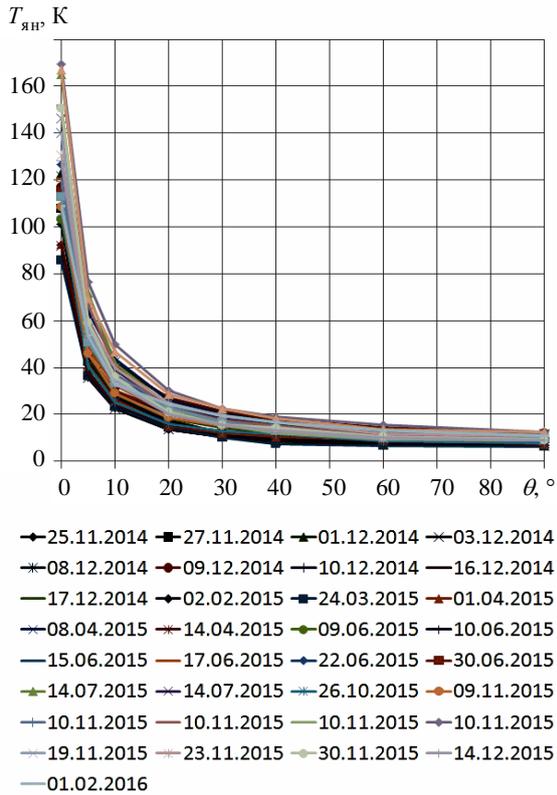


Рис. 6. Набор зависимостей $T_{ян}(\theta)$ для случаев ясного неба, умеренной облачности и слабого дождя (при отсутствии сильных атмосферных аномалий)

Существенно повысить точность определения температуры небосвода, а следовательно, и точность калибровки можно с помощью относительных измерений яркостной температуры $T_{ян}$ под разными углами места. Сделать это можно следующим образом.

Яркостная температура небосвода $T_{ян}$ складывается из температуры космического излучения (реликтовое излучение) $T_{як}$ и излучения, связанного с поглощением в атмосфере $T_{яат}$:

$$T_{ян} = T_{як} + T_{яат}.$$

Температура космического излучения равна 2,7 К в широком диапазоне частот [6]. При сильном увеличении поглощения в атмосфере и соответствующем росте яркостной температуры требования к точности калибровки снижаются, а вклад космического излучения уменьшается.

Излучение атмосферы $T_{яат}$ связано с толщиной ее эффективно поглощающего слоя, находящегося на линии визирования антенны. Для наземного радиометра толщина этого слоя зависит от угла места θ и для модели плоской Земли (что справедливо для небольших расстояний) однозначно связана с толщиной слоя атмосферы в зените через $\sin \theta$.

В общем случае зависимость $T_{яат}$ от толщины слоя носит нелинейный характер в связи с уменьшением вклада в яркостную температуру более удаленных участков атмосферы из-за поглощения излучения на пути к антенне радиометра. Однако с целью упрощения расчетов при очень малых значениях поглощения, соответствующих условиям проведения калибровки, этой нелинейностью можно пренебречь и записать выражение для яркостной температуры:

$$T_{яат}(\theta) = T_{яат}(90^\circ) / \sin \theta,$$

где $T_{яат}(90^\circ)$ соответствует тепловому излучению атмосферы в зените.

Измерив разность значений $T_{ян}$ под двумя разными углами, можно определить практически точное значение $T_{ян}$ в зените или при другом угле θ . Наиболее удобным вариантом являются измерения в зените и под углом места $\theta = 30^\circ$, когда толщина эффективно поглощающего слоя атмосферы вдвое больше и, следовательно, $T_{яат}(30^\circ)$ вдвое выше, чем в зените. Поэтому разность измеренных под этими углами температур будет просто равна яркостной температуре атмосферы в зените $T_{ян}(90^\circ)$. Добавив к этой температуре температуру космического излучения, мы получим точное значение $T_{ян}(90^\circ)$ для калибровки радиометра, которое необходимо установить на шкале температур с помощью регулировки усиления. При недоступности измерений в зените можно использовать другие углы, но желательно близкие к нему.

Определение $T_{ян}$ с помощью относительных измерений под разными углами повышает точность калибровки минимум на порядок и существенно расширяет диапазон погодных условий, при которых такая калибровка может использоваться.

Очевидно, что предлагаемая калибровка справедлива при отсутствии потерь в антенне и других элементах на входе радиометра. Однако легко показать, что эти потери (при равенстве температур всех узлов на входе радиометра) приводят лишь к некоторому уменьшению чувствительности системы при сохранении линейности шкалы $T_{я}$, а следовательно, и калибровки.

Для оперативной калибровки радиометра без перенаправления антенны, а также недоступности по каким-либо причинам (в том числе по погодным условиям) температуры относительно ясного неба удобно использовать внутренний калибровочный генератор, который предварительно должен быть откалиброван по температуре неба или с помощью внешнего калибровочного генератора.

На рис. 2 показан пример калибровочной записи радиометра. В режиме калибровки на шкале радиометра устанавливается температура, равная температуре опорной нагрузки. В данном случае это 300 К. Затем в режиме измерения антенна направляется в зенит и регулировкой усиления устанавливается $T_{я}$, соответствующая значению $T_{ян}$ (90°), определенная вышеописанным способом. В результате шкала радиометра будет соответствовать измеряемой $T_{я}$ во всем диапазоне возможных значений.

Откалибровав таким способом радиометр, можно произвести калибровку внутреннего калибровочного генератора. Для этого переходим в режим калибровки, включаем калибровочный генератор и, регулируя амплитуду его шумов, устанавливаем на шкале радиометра значение, например, на 200 К ниже температуры опорной нагрузки (правая часть графика на рис. 2). Теперь при включении калибровочного генератора яркостная температура на входе радиометра всегда будет уменьшаться на 200 К. Следовательно, для калибровки радиометра перед измерением необходимо в режиме калибровки регулировкой усиления выставить температуру на шкале радиометра на 200 К ниже предварительно установленной температуры опорной нагрузки.

В связи с тем, что со временем амплитуда калибровочного генератора может изменяться, необходимо периодически проводить его дополнительную калибровку, особенно при больших изменениях окружающей температуры. При этом не обязательно регулировать амплитуду генератора, а достаточно зафиксировать новое значение калибровочной температуры и в дальнейшем использовать его для калибровки.

4. Применение спутникового конвертера. Выше описана общая схема построения радиометра, пригодная для разных диапазонов частот. Наиболее важным элементом радиометра является усилитель высокой частоты, который должен иметь как можно более низкий уровень собственных шумов и высокую стабильность усиления. Обычно такие усилители отличаются большой стоимостью.

Для радиометров 3-см диапазона удачным решением может быть использование спутниковых конвертеров, обладающих низким уровнем собственных шумов (0,1...0,3 дБ) и хорошей стабильностью. Благодаря массовому производству стоимость спутниковых конвертеров невелика при их высоком качестве и надежности. Использование конвертеров позволяет существенно упростить конструкцию прибора. Малое потребление энергии не приводит к нагреву

СВЧ-блока, что также повышает стабильность работы радиометра.

На рис. 7 представлена реализованная автором схема радиометра с использованием спутникового конвертера Satcom S-104, а в табл. 2 – его параметры.

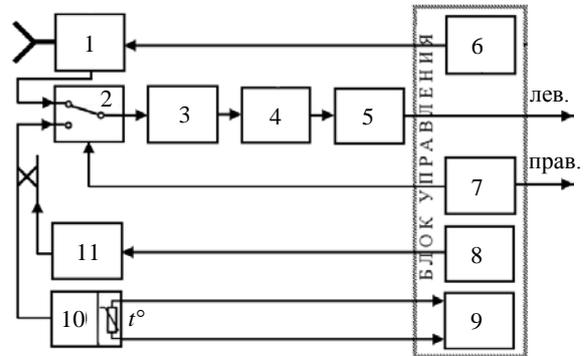


Рис. 7. Структурная схема радиометра со спутниковым конвертером: 1 – дистанционно-управляемый аттенуатор; 2 – мо-дулятор; 3 – спутниковый конвертер; 4 – усилитель промежуточной частоты; 5 – квадратичный детектор; 6 – переключатель состояния аттенуатора; 7 – генератор модуляционной частоты; 8 – блок питания генератора шума; 9 – термометр; 10 – опорная нагрузка с датчиком температуры; 11 – генератор шума

Таблица 2
Параметры радиометра с конвертером

Параметр	Значение
Рабочая частота, ГГц	11,7
Полоса частот радиометра, МГц	350
Флуктуационная чувствительность, К (при полосе фильтра на выходе 1 Гц)	0,1...0,2

В качестве примеров на рис. 8 приведена запись радиояркостной температуры небосвода в условиях умеренной облачности при разных углах места от зенита до горизонта, а на рис. 9 – изменение яркостной температуры во время сильного дождя при постоянном угле места $\theta = 30^\circ$.

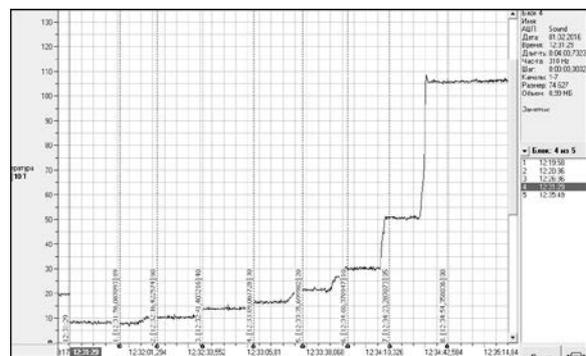


Рис. 8. Пример записи $T_{ян}$ при разных углах места от зенита до горизонта (малооблачная атмосфера)

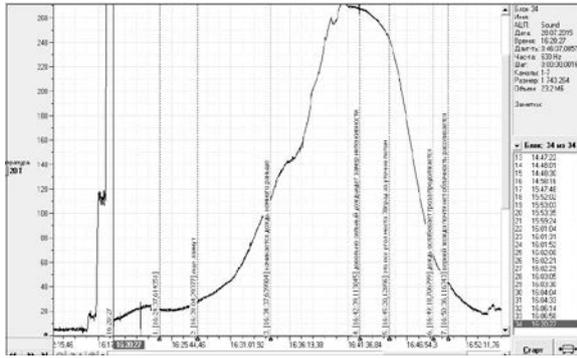


Рис. 9. Изменение $T_{\text{я}}$ во время сильного дождя $\theta = 30^\circ$

Выводы. Предложенные в работе схема построения радиометра с управляемым аттенуатором на входе и метод калибровки с применением относительных измерений для точного определения температуры неба в зените упрощают проведение калибровки и повышают ее точность.

Точность такого метода калибровки дает возможность измерять поглощение в атмосфере, составляющее сотые и даже тысячные доли децибела, что существенно расширяет возможности 3-см радиометра для изучения параметров атмосферы.

Использование спутникового конвертера позволяет повысить чувствительность и стабильность радиометра, а также упростить его конструкцию.

Ориентировочное значение яркостной температуры небосвода в зените при отсутствии сильных аномалий, таких как грозовые облака и ливневые дожди, на 10 ГГц равно 9 К.

Библиографический список

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко, Г. Г. Шукин, Л. П. Бобылев, С. Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 283 с.
2. Фалин В. В. Радиометрические системы СВЧ / В. В. Фалин. – М.: Луч, 1997. – 440 с.
3. Справочник по радиолокации: в 4 т. Т. 4 / под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
4. Михайлов В. Ф. Микроволновая спутниковая аппаратура дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / В. Ф. Михайлов, И. В. Брагин, С. И. Брагин. –

СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосмич. приборостроения, 2003. – 404 с.

5. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю. А. Мельник, С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко и др.; под ред. Ю. А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
6. Зельдович Я. Б. Релятивистская астрофизика / Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков. – М.: Наука, 1967. – 656 с.

Рукопись поступила 01.04.2016.

V. A. Kabanov

A RADIOMETER FOR METEOROLOGICAL MEASUREMENTS WITH ACCURATE CALIBRATION BY THE SKY BRIGHTNESS TEMPERATURE

Methods for passive sensing the atmosphere in the microwave range are one of important directions of remote sensing of environmental protection. To develop simple and cost-effective technical solutions and radiometric measuring techniques is an important task. A simple mobile radiometric system of 3-cm wavelength range designed for meteorological research has been presented. The radiometer is made on the basis of modulation scheme with some features of construction elements and input calibration. A method for accurate determination of the sky brightness temperature used for calibrating radiometric system has been proposed. A variant of constructing a radiometer with the use of satellite converter gas been implemented.

Key words: brightness temperature, radiometer, attenuator, calibration.

В. О. Кабанов

РАДИОМЕТР ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ З ТОЧНИМ КАЛІБРУВАННЯМ ЗА ЯСКРАВІСНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ НЕБА

Методи пасивного зондування атмосфери у НВЧ-діапазоні є одним з актуальних напрямків дистанційного зондування навколишнього середовища. Важливим завданням залишається розробка простих і економічних технічних рішень і методик радіометричних вимірювань. Представлена проста мобільна радіометрична система 3-см діапазону хвиль, призначена для метеорологічних досліджень. Радіометр виконаний за модуляційною схемою з деякими особливостями побудови вхідних елементів і проведення калібрування. Запропоновано спосіб точного визначення яскравісної температури неба, використуваної для калібрування радіометричної системи. Реалізовано варіант побудови радіометра із застосуванням спутникового конвертера.

Ключові слова: яскравісна температура, радіометр, аттенуатор, калібрування.