Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для натурных и лабораторных измерений

В.М. Анискович¹, А.В. Кузьмин¹, Д.С. Сазонов¹, В.Б. Хайкин^{2,3}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*
E-mail: alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru

² *Специальная астрофизическая обсерватория РАН, с. Зеленчукская, Россия*

³ *Научно-производственная фирма «Айсберг-НТ», Санкт-Петербург, Россия*
E-mail: vkhstu@mail.ru

В работе описывается разработанный микроволновый радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см, который представляет собой модуляционный радиометр прямого усиления с центральной частотой 36,0 ГГц и полосой 2 ГГц. Для переключения поляризаций входящего излучения используется фарадеевский вращатель плоскости поляризации (ФВП), установленный на входе радиометра после скорректированной рупорной антенны. Предусмотрена возможность работы радиометра в нескольких режимах, которые задаются с компьютера перед началом работы. Модуляционные режимы предусматривают работу радиометра по приему от одной до четырех поляризаций принимаемого излучения, повернутых относительно входного волновода СВЧ-тракта на 0°, -45°, +45°, 90°. Кроме радиометрических данных, оцифровываются и передаются на компьютер данные двух инклинометров в диапазоне углов $\pm 90^\circ$, установленных в ортогональных плоскостях, которые показывают ориентацию радиометра в пространстве, и трех термодатчиков, расположенных на модуляторе, СВЧ-усилителе и корпусе радиометра. Все элементы радиометра, включая платы АЦП, источники питания и драйверов устройств, установлены в герметичном алюминиевом корпусе, в котором поддерживается с помощью устройства термостатирования температура около 42°C с точностью 0,1°C на плате, где закреплены все СВЧ-устройства. Чувствительность радиометра в режиме приема четырех поляризаций составила менее 0,1 К для времени накопления 1 с. Для калибровки радиометра используются два широкоапертурных термостатированных излучателя настроенных на температуру 310,5 К и 342,4 К.

Ключевые слова: микроволновое излучение, микроволновый радиометр, радиометр-поляриметр, дистанционное зондирование, широкоапертурный излучатель

Одобрена к печати: 25.02.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223

Введение

Микроволновые аэрокосмические исследования окружающей среды стали нормой нашей жизни. Микроволновые средства диагностики могут быть разделены на два больших класса: активные, к которым относятся радиолокаторы, скаттерометры и альтиметры, и пассивные – радиометры различных типов. Без микроволновых радиометров, к примеру, не обходится ни один расчет прогноза погоды. Микроволновые радиометры используются в определении температуры поверхности океана и интегрально-влажностных параметров атмосферы, в диагностике лесных пожаров и измерении влажности почв, в исследовании структуры атмосферных процессов и поверхностного волнения моря. Наряду с микроволновыми радиометрами, устанавливаемыми на космические аппараты, необходимы радиометрические приемники для широкого спектра наземных измерений, таких как лабораторные исследования излучательных характеристик различных типов поверхностей, натурные измерения параметров морской поверхности с береговых оснований и морских платформ, диагностика атмосферных процессов и проведение спутниковых измерений.

Разработкой и созданием микроволновых радиометров в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) занимаются с конца 1970-х годов под руководством В.С. Эткина и И.А. Струкова. Отдел под руководством В.С. Эткина занимался исследованием ха-

рактических характеристик морской поверхности с помощью микроволновых радиометров (Эткин и др., 1987), а отдел И.А. Струкова разрабатывал радиометры для космического проекта «Реликт» (Струков, 1986), для измерения малых газовых составляющих и температурно-влажностных характеристик атмосферы (Кадыгров, 2009).

Исследование параметров морской поверхности показали, что определение поляризационных характеристик собственного микроволнового излучения позволяет увеличить информативность измерений. В частности, использование поляризационных измерений микроволнового излучения дает возможность определять скорость и направление приповерхностного ветра. Это связано с тем, что морское волнение в гравитационно-капиллярной области обладает ярко выраженной азимутальной анизотропией, что приводит, в свою очередь, к анизотропии поляризационных характеристик теплового радиоизлучения морской поверхности (Беспалова и др., 1979, 1982).

В работе приводится описание разработанного радиометра-поляриметра прямого усиления диапазона 0,8 см, предназначенного для натурных и лабораторных измерений микроволнового излучения в диапазоне радиоярких температур от 0 до 400 К с возможностью определения первых трех параметров Стокса.

Общие положения

Радиометр-поляриметр Р08П представляет собой модуляционный радиометр прямого усиления с возможностью измерения поляризационных характеристик принимаемого излучения. На *рис. 1* представлена фотография двух радиометров Р08П.

Рис. 1. Внешний вид радиометров Р08П

Центральная частота принимаемого электромагнитного излучения равна 36,0 ГГц, полоса приема – 2 ГГц. Антенна радиометра представляет собой скорректированный круглый рупор, разработанный в отделе И.А. Струкова ИКИ РАН, который имеет диаграмму направленности 9° по уровню -3 дБ. Данная антенна имеет очень высокий уровень потоковой эффективности порядка 0,99 и низкий уровень эллиптичности. Как таковых боковых лепестков эта антенна не имеет. Структурная схема радиометра-поляриметра представлена на *рис. 2*. Радиометр снабжен термостатом, который с помощью элементов Пельтье поддерживает температуру плиты радиометра, где крепятся элементы СВЧ, с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Питание радиометра осуществляется от сети постоянного тока напряжением от 18 до 36 В, потребление радиометра в режиме разогрева составляет 30 Вт, а в рабочем режиме – 13 Вт.

Рис. 2. Структурная схема радиометра-поляриметра P08П. 1 – скорректированный рупор; 2 – фарадеевский вращатель плоскости поляризации (ФВПП); 3 – модулятор, на котором закреплен термодатчик ТД-1; 4 – микроволновой вентиль; 5 – малошумящий приемный модуль, на котором закреплен термодатчик ТД-2; 6 – инклинометр угла места; 7 – инклинометр угла крена; 8 – плата АЦП, которая служит для создания модулирующих сигналов, оцифровки микроволнового сигнала, данных инклинометров и термодатчиков, организации выходной информации через интерфейс RS-232 для передачи ее в регистрирующий компьютер; 9 – плата драйверов, термостата и источников питания; 10 – блок питания. Термодатчик ТД-3 закреплен на корпусе радиометра

На *рис. 3* показана фотография внутренней части радиометра P08П со стороны элементов СВЧ. В этой части сверху через разъемы устанавливается плата АЦП, которая представляет собой устройство обработки радиометрической информации. Радиометрические данные оцифровываются четырехканальным АЦП и с помощью микропроцессора Atmega128 передаются на компьютер через интерфейс RS-232. В свою очередь, компьютер перед началом работы задает режим работы контроллера и тем самым всего радиометра.

С противоположной стороны корпуса крепится плата драйверов, термостата и источников питания, которая обеспечивает работу схемы термостата, получает необходимого вида сигналы на ФВПП и модулятор и организует необходимые питания для всех устройств радиометра.

Рис. 3. Фотография внутренней части радиометра Р08П со стороны элементов СВЧ. 1 – часть корригированного рупора; 2 – фарадеевский вращатель плоскости поляризации (ФВПП); 3 – модулятор; 4 – микроволновой вентиль; 5 – малошумящий приемный модуль; 6 – инклинометр угла места; 7 – инклинометр угла крена; 8 – термодатчик ТД-3, измеряющий температуру корпуса; 9 – элементы Пельтье ТЭМО-9; 10 – разъемы для платы АЦП

Фарадеевский вращатель плоскости поляризации

Основным элементом радиометра Р08П, позволяющим измерять поляризационные характеристики принимаемого электромагнитного излучения, является вращатель плоскости поляризации на эффекте Фарадея (ФВПП) – гиратор. В зависимости от величины протекающего тока гиратор поворачивает плоскость поляризации принимаемого излучения на определенный угол. Применяемый в радиометре ФВПП изготовлен по заказу в НИИ «Феррит-Домен» в Санкт-Петербурге. Параметры ФВПП приведены в *табл. 1*.

Отметим достаточно высокие параметры данных гираторов. Небольшие прямые потери – практически во всей полосе и на всех углах поворота плоскости поляризации они составляют порядка 0,7 дБ. Важнейшей характеристикой гиратора является величина развязки ортогональных поляризаций, которая определяет, насколько ортогональные поляризации будут «проникать» друг в друга. Величина развязки у нашего ФВПП более 20 дБ во всем интервале углов поворота плоскости поляризации, что является достаточно хорошим показателем.

Таблица 1. Характеристики фарадеевского вращателя поляризаций 0,8-см диапазона в нормальных условиях. Центральная частота : 36,0 ГГц, полоса частот 2,0 ГГц. В полосе 35,3–37,0 ГГц потери $\alpha_{\max}$ меньше указанных на 0,1–0,15 дБ и минимальные развязки выше указанных на 0,5–1,0 дБ.

Угол поворота плоскости поляризации φ°	Ток управл. $I_{\text{упр}}$ (мА)	Потери (дБ)			Развязки (дБ) $\min$	КСВн $\min - \max$
		$\alpha_{\text{ср}}$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$		
+135	-149/-146	0,7	0,6	0,8	21	1,15–1,35
+90	-98/-90	0,7	0,6	0,8	22	
+45	-52/-43	0,75	0,6	0,9	20	
0	+5/-3	0,75	0,6	0,9	25	
-45	+52/+43	0,75	0,6	0,9	20	
-90	+102/+95	0,7	0,6	0,8	22	
-135	+151/+148	0,7	0,6	0,8	21	

Ток управления поворотом плоскости поляризации достаточно высок, он достигает почти 100 мА при повороте на угол 90°. Это вызывает серьезные трудности при реализации схемы питания гиратора при использовании в качестве модуляции меандра, особенно, если учесть величину индуктивности гиратора порядка 0,7 мГн. «Завал» переднего и заднего фронтов при прямоугольной модуляции составил величину порядка 40–50 мкс. Именно эта величина определяет максимальную частоту модуляции.

Малозумящий приемный модуль 0,8 см диапазона

Малозумящий приемный модуль (МПМ) 0,8 см диапазона разработан и изготовлен в НПФ «Айсберг-НТ» (Санкт-Петербург). МПМ выполнен по схеме прямого усиления на монолитных интегральных МШУ чипах с коэффициентом шума < 2 дБ. МПМ состоит из волноводно-полоскового перехода, трех каскадов МШУ, ППФ, низкочастотного детекторного диода и предварительного усилителя НЧ (ПУНЧ). Для формирования нужной полосы МПМ были разработаны 5-ти звенные микрополосковые ППФ на подложке из тонкого поликора с напылением. Измеренная полоса МПМ составила 36±0,8 ГГц по уровню -3 дБ и 2,6 ГГц по уровню -20 дБ. ППФ установлен перед третьим каскадом МШУ, чтобы избежать сложностей его согласования с высокоомным низкочастотным детекторным диодом Шоттки с нулевым смещением. Для подавления распространения высших мод и достижения высокой стабильности усиления все СВЧ элементы МПМ установлены в запердечном волноводном объеме. Температурный коэффициент передачи МПМ 7 мВ/К, измеренная флуктуационная чувствительность МПМ в режиме полной мощности 17 мК/Гц^{1/2}, измеренная долговременная стабильность МПМ в условиях высокоточного реверсивного термостатирования (±0,1 К) – не хуже 0,3 К (Хайкин и др., 2012). МПМ имеет компактные размеры 24×24×63 мм³, выходной диапазон сигнала 0–5 В, напряжение питания +3,5 В, ±12 В.

Обработка радиометрического сигнала

Плата АЦП представляет собой устройство сбора информации. Данные, принимаемые радиометром, оцифровываются четырехканальным АЦП и с помощью микропроцессора Atmega128 передаются на компьютер через интерфейс RS-232. Микропроцессор выдает согласно заданной программе модулирующие сигналы для работы модулятора и гиратора. Предусмотрена возможность работы радиометра в нескольких режимах, которые задаются с компьютера перед началом работы. Модуляционные режимы предусматривают работу радиометра по приему от одной до четырех поляризаций излучения, повернутых относительно входного волновода СВЧ-тракта на 0° , -45° , $+45^\circ$, 90° . Кроме радиометрических данных, оцифровываются и передаются на компьютер данные двух инклинометров в диапазоне углов $\pm 90^\circ$, установленных в ортогональных плоскостях, и трех термодатчиков, расположенных на модуляторе, СВЧ-усилителе и корпусе радиометра.

Работа устройства сбора информации организована во времени циклически, причем существуют 2 временных масштаба циклов: такты порядка $t_0 \approx 1$ мс, которых может быть несколько (от 2 до 5) в строке, и периодичность импульсов запуска АЦП порядка 10 мкс.

Внутри такта происходят переключения модулятора и гиратора. Вариант режима работы задается командным словом перед началом приема. В течение каждого такта происходит оцифровка его аналогового выхода радиометра. Оцифровка происходит не в течение всего такта, а с некоторой задержкой t_1 (задаваемой программно) относительно его начала и заканчивается за время t_2 до его конца, чтобы не регистрировать переходные процессы при переключении модулятора и гиратора. Частота запуска АЦП составляет 100 кГц. В зависимости от режима работы радиометра, схема приема радиометрической информации выделяет соответствующие радиометрические каналы. Для каждого из радиометрических каналов отсчеты, полученные на протяжении одного такта, суммируются (и усредняются) с сохранением нужного числа разрядов. Далее, если применяется модуляционный режим, то происходит синхронное детектирование путем вычитания из антенных радиометрических каналов (ВП, ГП или $\pm 45^\circ$) канала согласованной нагрузки ТМ, и полученная величина является выходной для передачи в информационную линию после необходимого цифрового усреднения τ , которое задается также в командном слове. Аналогичным образом оцифровываются данные с двух инклинометров, с той разницей, что в этом случае нет модуляции. Поскольку канал передачи последовательный, количество битов при передаче определяется заданной точностью одного канала, умноженной на количество антенных каналов и инклинометров. Помимо этого, в сбрасываемую информацию добавляются еще данные о трех термодатчиков.

Наконец, внутри строки содержится некоторое количество – от 2 до 5 – одинаковых по длительности тактов. В *табл. 2* приведены основные режимы работы радиометра-поляриметра P08П.

Табл. 2. Основные режимы работы радиометра-поляриметра Р08П

Режим	Радиометрические каналы	После синхронного детектирования	После цифрового фильтра с постоянной времени τ	Строка в последовательной линии с интервалом τ
Одна поляризация	ВП, ТМ	$(ВП-ТМ)=T_0$	T_0	$T_0, I_1, I_2, Td_1, Td_2, Td_3$
Две поляризации	ВП, ГП, ТМ	$(ВП-ТМ) = T_0,$ $(ГП-ТМ) = T_{90}$	T_0, T_{90}	$T_0, T_{90}, I_1, I_2, Td_1, Td_2, Td_3$
Четыре поляризации	ВП, ГП, $+45^\circ, -45^\circ$, ТМ	$(ВП-ТМ) = T_0,$ $(ГП-ТМ) = T_{90},$ $(+45^\circ-ТМ) = T_{+45},$ $(-45^\circ-ТМ) = T_{-45}$	$T_0, T_{90}, T_{45}, T_{-45}$	$T_0, T_{90}, T_{45}, T_{-45}, I_1, I_2, Td_1, Td_2, Td_3$

ВП, ГП, $+45^\circ, -45^\circ$ – сигналы вертикальной, горизонтальной поляризации, поляризаций;
 $+45^\circ$ и -45° , ТМ – сигнал согласованной нагрузки;
 I_1, I_2 – сигнал инклинометров;
 T_{d1}, T_{d2}, T_{d3} – сигналы температурных датчиков.

Юстировка, калибровка и натурные испытания

Перед натурными измерениями были проведены многочисленные испытания и юстировки различных систем радиометра-поляриметра Р08П. Была тщательно отлажена электронная и тепловая схема термостата, чтобы добиться поддержания температуры опорной нагрузки, ФВПП, модулятора, других элементов входного тракта, а также МПМ с точностью $0,1^\circ\text{C}$.

Особое место было уделено юстировке углов установки плоскости поляризаций. Измерения плоскости поляризаций проводились с помощью газоразрядного генератора шума Я5Х-272, который устанавливался на измерительную треногу таким образом, чтобы продольная ось выходного волновода была направлена горизонтально. С помощью поворотного устройства измерительной треноги генератора шума мог поворачиваться вокруг горизонтальной оси на нужный угол. Излучение от генератора шума с линейной поляризацией подавалось через аттенюатор на корригированный рупор аналогичный тому, что используется в радиометре. Соосно с излучающей антенной на расстоянии 3 м устанавливался радиометр, угол плоскости поляризаций которого измерялся на основании данных принимаемой мощности сигнала от генератора шума.

На *рис. 4* представлен один из результатов измерений установки углов поляризаций в различных режимах. В ходе этих измерений обнаружился эффект остаточной намагниченности ферритового сердечника гиратора, который приводил в разных режимах к сдвигу плоскости поляризаций на угол $3-5^\circ$. Так, после такта поворота плоскости поляризации на 90° следовал такт опорной нагрузки, в который на гиратор ток не подавался, а далее следовал такт «прямой» поляризации (в нашем случае вертикальной), когда ток на гиратор также не подавался. Тогда и оказывалось, что «прямая» поляризация повернута на угол порядка 4° . Была изменена схема питания ФВПП, в которую включили возможность подавать коррекци-

рующий ток на гиратор во время такта опорной нагрузки. Тем самым мы сумели выправить этот сдвиг плоскости поляризации.

Рис.4. Измерения установки углов поляризаций в различных режимах

Для абсолютной калибровки радиометров в лабораторных условиях использовались широкоапертурный азотный излучатель, изготовленный ВНИИФТРИ по проекту МИВЗА (Алексеев и др., 2003) и широкоапертурный термостатированный излучатель, разработанный там же по проекту «Реликт» (Струков, 1986). Излучающими элементами в обеих нагрузках служили периодические наборы кремниевых конусных излучателей, рассчитанных на диапазон 36 ГГц. Коэффициент черноты этих излучателей составлял 0,999 для рабочей полосы частот радиометров. Для калибровки в натурных условиях были изготовлены два широкоапертурных термостатированных на основе элементов Пельтье излучателя, излучающими элементами в которых были периодические системы конусных излучателей из вспененной угольной крошки, рассчитанные на диапазон 0,8 см, с коэффициентом черноты не менее 0,99. Температура одного из излучателей была установлена $+13,2^\circ\text{C}$ (310,5 К), а второго – $+45,1^\circ\text{C}$ (342,4 К). Точность поддержания температуры излучателей составляла $\pm 0,2^\circ\text{C}$ в диапазоне температур окружающей среды от 10 до 30°C .

Натурные испытания радиометров проводились как на крыше ИКИ РАН, так и на базе Южного отделения ИО РАН в Голубой бухте близ г. Геленджик в сентябре 2013 и 2014 гг.

Радиометры размещались на конце пирса на поворотной платформе. На *рис. 5* представлены фотографии комплекса радиометров в режиме измерений и калибровки с помощью широкоапертурных термостатированных излучателей. Испытания показали высокую чувствительность и стабильность радиометров. Приведенная чувствительность в режиме четырех поляризаций составила менее 0,1 К.

Рис. 5. Фотографии комплекса радиометров Р08П в режиме измерений и калибровки с помощью широкоапертурных термостатированных излучателей

Заключение

Описан разработанный микроволновый радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см, который представляет собой модуляционный радиометр прямого усиления с центральной частотой 36,0 ГГц и полосой 2 ГГц. Для переключения поляризаций входящего излучения используется фарадеевский вращатель плоскости поляризации (ФВП), установленный на входе радиометра. Предусмотрена возможность работы радиометра в нескольких режимах, которые задаются с компьютера перед началом работы. Модуляционные режимы предусматривают работу радиометра по приему от одной до четырех поляризаций принимаемого излучения, повернутых относительно входного волновода СВЧ-тракта на 0° , -45° , $+45^\circ$, 90° . В дополнение к радиометрическим данным, оцифровываются и передаются на компьютер данные двух инклинометров в диапазоне углов $\pm 90^\circ$, установленных в ортогональных плоскостях, которые позволяют определить ориентацию радиометра в пространстве, и трех термодатчиков, расположенных на модуляторе, СВЧ-усилителе и корпусе радиометра. Все элементы радиометра установлены в герметичном алюминиевом корпусе, в котором

поддерживается с помощью устройства термостатирования температура около 42°C с точностью 0,1°C на плите, где закреплены СВЧ-устройства. Чувствительность радиометра в режиме приема четырех поляризаций составила менее 0,1 К для времени накопления 1 с. Для калибровки радиометра используются два широкоапертурных термостатированных излучателя настроенных на температуру 310,5 К и 342,4 К.

Литература

1. Алексеев П.В., Викторов А.С., Волков А.М., Гончаров А.К., Гордон З.И., Данекин А.И., Кочеров С.А., Некрасов В.В., Пахомов Л.А., Прохоров Ю.Н., Феокистов А.А., Хапин Ю.Б. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исследования Земли из космоса, 2003. № 6. С. 68–76.
2. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Гершензон В.Е., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Раев М.Д., Трохимовский Ю.Г., Семин А.Г., Смирнов Н.К., Скачков В.А., Хапин Ю.Б., Чистяков В.Н., Шарков Е.А., Эткин В.С. Об определении скорости приповерхностного ветра по измерениям поляризационной анизотропии собственного и рассеянного СВЧ-излучения // Исследование Земли из космоса. 1982. № 1. С. 87–94.
3. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Глотов А.А., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С. Исследование анизотропии ветрового волнения по вариациям поляризованного теплового излучения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1482–1485.
4. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя-метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 697–704.
5. Струков И.А. Исследование анизотропии реликтового излучения с борта ИСЗ. Эксперимент «Реликт» // В сб.: Итоги науки и техники. Астрономия. Т. 31. М. 1986. С. 37–73.
6. Хайкин В.Б., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е. Высокоточные радиометры на 22 и 36 ГГц для непрерывного мониторинга поглощения атмосферы на радиотелескопе РАТАН-600 // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. С. 199–205.
7. Эткин В.С., Алексин Б.Е., Анискович В.М., Беляков Г.И., Болотникова Г.А., Ворсин Н.Н., Дикович С.В., Забышный А.И., Комаров Н.Л., Кузьмин А.В., Литовченко К.Ц., Малеев С.М., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Никитин В.В., Николаев Е.С., Раев М.Д., Поспелов М.Н., Смирнов А.И., Степанов К.Г., Трохимовский Ю.Г., Хрупин А.С., Шарапов А.Н. Многоканальный самолетный комплекс для радиогидрофизических исследований. Препринт ИКИ РАН Пр-1279. М.: ИКИ РАН, 1987. 43 с.

Radiometer-polarimeter at 0.8 cm for field and laboratory measurements

V.M. Aniskovich¹, A.V. Kuzmin¹, D.S. Sazonov¹, V.B. Khaikin^{2,3}

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru

² Special Astrophysical Observatory RAS, Zelenchukskaya, Russia

³ Scientific Industrial Firm "Iceberg-NT", St. Petersburg, Russia

E-mail: vkhstu@mail.ru

The paper describes a microwave radiometer-polarimeter at 0.8 cm wavelength, a modulation radiometer with a center frequency of 36.0 GHz and bandwidth of 2 GHz. To switch between the polarizations of the incoming radiation, Faraday rotation of polarization plane (FRPP) unit is placed at the front end of the radiometer and after a corrugated horn antenna. The radiometer can operate in several modes; computer chooses one of them before measurements start. The modulation modes differ in number of radiation polarizations received by the radiometer: from one to four rotated by 0°, -45°, +45°, and 90° relative to the input waveguide of the microwave path. Beside radiometer data, the following data are also digitized and transmitted to the computer: (a) the data of two inclinometers in the angle range of $\pm 90^\circ$ that are mounted on orthogonal planes and indicate the radiometer orientation; and (b) the data of three temperature sensors located on the modulator, microwave amplifier and radiometer housing. All elements of the radiometer including additional ADCs, power supplies and device drivers are installed in a sealed aluminum enclosure, which is maintained by thermostating device at temperature of about 42°C within the range of 0.1 °C in the plate where all microwave devices are fixed. Radiometer sensitivity in receiving mode of four polarizations is less than 0.1 K for the accumulation time of 1 second. For calibration of the radiometer, two wide-temperature-controlled transmitters configured for temperatures 310.5 K and 342.4 K are used.

Keywords: microwave radiation, microwave radiometer, radiometer-polarimeter, remote sensing, wide-emitter

Accepted: 25.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223

References

1. Alekseev P.V., Viktorov A.S., Volkov A.M., Goncharov A.K., Gordon Z.I., Danekin A.I., Kocherov S.A., Nekrasov V.V., Pahomov L.A., Prohorov Yu.N., Feoktistov A.A., Khapin Yu.B. Mikrovolnovyj skaniruyushchij radiometr integral'nogo vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery (MIVZA) (Microwave Scanning Radiometer integral humidity atmospheric sounding (MIVZA)), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 6, pp. 68–76.
2. Bespalova E.A., Veselov V.M., Gershenson V.E., Milickij Yu.A., Mirovskij V.G., Pokrovskaya I.V., Raev M.D., Trohimovskij Yu.G., Semin A.G., Smirnov N.K., Skachkov V.A., Khapin Yu.B., Chistyakov V.N., Sharkov E.A., Etkin V.S. Ob opredelenii skorosti pri poverhnostnogo vetra po izmereniyam polarizatsionnoj anizotropii sobstvennogo i rasseyannogo SVCh-izlucheniya (Determination of the speed of the surface wind measurements of the polarization anisotropy own and scattered microwave radiation), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1982, No. 1, pp. 87–94.
3. Bespalova E.A., Veselov V.M., Pokrovskaya I.V., Popov A.E., Raev M.D., Sharkov E.A., Etkin V.S. Issledovanie anizotropii vetrovogo volneniya po variatsiyam polarizovannogo teplovogo izlucheniya (Investigation of the anisotropy of wind waves on variations of polarized thermal radiation), *Doklady AN SSSR*, 1979, Vol. 246, No. 6, pp. 1482–1485.
4. Kadyrov E.N. Mikrovolnovaya radiometriya atmosfernogo pogranichnogo sloya-metod, apparatura, rezul'taty izmerenij (Microwave radiometry of the atmospheric boundary layer method, apparatus, measurement results), *Optika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 22, No. 7, pp. 697–704.
5. Strukov I.A. Issledovanie anizotropii reliktovo izlucheniya s borta ISZ. Eksperiment «Relikt» (Research CMB anisotropy on board satellites. Experiment «Relikt»), In: *Itogi nauki i tekhniki. Astronomiya*, 1986, Vol. 31, pp. 37–73.
6. Khaikin V.B., Radzihovskij V.N., Kuz'min C.E. Vysokotochnye radiometry na 22 i 36 GGc dlya nepreryvnogo monitoringa pogloshcheniya atmosfery na radioteleskope RATAN-600 (High-precision radiometers at 22 and 36 GHz for continuous monitoring of atmospheric absorption of the RATAN-600), *Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN*, 2012, pp. 199–205.
7. Etkin V.S., Aleksin B.E., Aniskovich V.M., Belyakov G.I., Bolotnikova G.A., Vorsin N.N., Dikovich S.V., Zabyshnyi A.I., Komarov N.L., Kuzmin A.V., Litovchenko K.Ts., Maleev S.M., Militskii Yu.A., Mirovskii V.G., Nikitin V.V., Nikolaev E.S., Raev M.D., Pospelov M.N., Smirnov A.I., Stepanov K.G., Trokhimovskii Yu.G., Khrupin A.S., Sharapov A.N., *Mnogokanal'nyi samoletnyi kompleks dlya radiogidrofizicheskikh issledovanii. Preprint Pr-1279* (Multichannel complex for aerial hydrophysical studies. Preprint Pr-1279), Moscow: IKI RAS, 1987, 43 p.