

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК: 621.385.69

**ЮСТИРОВКА И ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ ПОЛЯРИЗАЦИЙ
В МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРАХ**

© 2024 г. А. В. Кузьмин^{а, *}, В. В. Стерлядкин^б

^а*Институт космических исследований Российской академии наук
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

^б*МИРЭА — Российский технологический университет
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78*

*e-mail: kuzmin@cosmos.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принята к публикации 19.02.2024 г.

Рассмотрен способ измерения и установки четырех переключаемых плоскостей поляризаций в микроволновом радиометре, в котором используется ячейка Фарадея. Калибруемый радиометр предназначен для регистрации тонких поляризационных эффектов, например азимутальной анизотропии, возникающей при формировании собственного излучения взволнованной морской поверхности. Для решения таких задач требуется абсолютная привязка всех поляризационных режимов работы радиометра к уровню горизонта с точностью не хуже 0.5° . В предлагаемой схеме измерений в качестве широкополосного микроволнового источника использовалось излучение газоразрядной трубки с выходной антенной с горизонтальной поляризацией, которое дополнительно отражалось от водной поверхности при угле Брюстера. Это обеспечило дополнительное подавление вертикальной составляющей излучения на -12 дБ и формирование строго горизонтальной поляризации отраженной волны, поскольку свободная поверхность воды в ванне горизонтальна с погрешностью не более 0.05° . Традиционные источники поляризованного излучения не обеспечивают горизонтальную ориентацию излучаемого сигнала с указанной точностью. В предложенном методе погрешности установки вертикальной, горизонтальной и скрещенных под углами $\pm 45^\circ$ плоскостей поляризации составили не более $\pm 0.3^\circ$ относительно горизонта. Измерение углов установки плоскости поляризации проводилось с точностью 0.1° посредством вращения радиометра вокруг оси приемной антенны и аппроксимации данных законом Малюса. Настройка углов управлялась токами через ячейку Фарадея.

DOI: 10.31857/S0032816224040209 EDN: NXYZAZA

1. ВВЕДЕНИЕ

Микроволновые радиометры имеют широкое применение в экологических исследованиях Земли в определении свойств подстилающей поверхности и атмосферы. В большинстве экспериментов используются одна или две линейные поляризации: вертикальная и горизонтальная. Однако для поверхностей или сред, имеющих периодическую структуру, на-

пример для взволнованной водной поверхности, часто необходимо определять поляризационный эллипс микроволнового излучения или параметры Стокса [1–3]. При дистанционном зондировании Земли из космоса широкое применение получили микроволновые радиометрические комплексы, включая российский МТВЗА-ГЯ (микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования ат-

мосферы, ГЯ – в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) и его зарубежные аналоги SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) [4], AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) [5] и др., в которых восстановление метеопараметров атмосферы и подстилающей поверхности основывается на весьма тонких различиях между каналами с различными поляризациями. В институте космических исследований (ИКИ РАН) проводятся комплексные экспериментальные работы по изучению связи поляризационного портрета морской поверхности в микроволновом диапазоне со спектром волнения и ветровым полем. Эти исследования основаны на новых методах натуральных измерений полной структуры морского волнения, которое включает капиллярные волны [6, 7], и на измерениях поляризационного эллипса собственного излучения поверхности [8, 9]. Поляризационные измерения собственного излучения морской поверхности и атмосферы в широком диапазоне углов зондирования позволяют проводить прямые измерения эффективного коэффициента отражения взволнованной морской поверхности и рассматривать его связь с ветровым полем [10, 11]. При выполнении перечисленных экспериментальных задач важнейшим фактором успеха становятся точная настройка плоскости поляризации радиометров, ее абсолютная привязка к уровню горизонта и надежное переключение в процессе работы. Данная публикация посвящена решению этой проблемы.

Разделение поляризаций в радиометрах осуществляется двумя способами. Первый – это разделение излучения механическим устройством в круглом волноводе на горизонтальную и вертикальную поляризации, их усиление и детектирование, а затем с помощью корреляционной обработки аналоговым или цифровым устройством обоих сигналов получение полной матрицы Стокса. Этот способ достаточно сложный в части корреляционной обработки и получения двух равных трактов сигналов по потерям и фазовым искажениям [1]. В наших радиометрах использован другой способ.

Второй способ более простой и дешевый – это разделение поляризаций с помощью фарадеевского вращателя плоскости поляризации (ФВПП), или ячейки Фарадея. Поворот плоскости поляризации в ФВПП осуществляется магнитным полем, создаваемым соленоидом, через

который протекает постоянный ток определенной величины. Угол поворота плоскости поляризации зависит от величины тока. В используемом приборе переключение поляризаций осуществляется циклически по схеме $0, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$ с периодом 1 мс [8].

Проверка углов установки плоскостей поляризации обычно осуществляется вращением приемной антенны радиометра вокруг собственной оси при регистрации прямого сигнала от источника с известной линейной поляризацией излучения. Как показывает опыт, при таких измерениях привязать углы установки плоскости поляризации к уровню горизонта с точностью лучше 3° достаточно сложно. Это объясняется тем, что прямоугольный волновод, согласованный с излучающей антенной, и дополнительный поляризатор на выходе антенны в виде решетки металлических струн, не привязаны к абсолютному горизонту, тем более с учетом того, что такая привязка должна быть выполнена в широкой рабочей полосе радиометра.

В предлагаемой работе рассматривается новый способ установки и настройки углов поворота плоскости поляризации радиометра с абсолютной привязкой к горизонту. Абсолютная погрешность установки заданных поляризаций в пространстве составляет $0.2\text{--}0.3^\circ$. В предлагаемой схеме измерений используется излучение горизонтальной поляризации, отраженное от водной поверхности при угле Брюстера, что обеспечивает дополнительное подавление возможной вертикальной составляющей излучения и с точностью 0.05° обеспечивает абсолютную горизонтальную поляризацию отраженной электромагнитной волны.

2. СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И АППАРАТУРА

На рис. 1 вверху показана схема установки, предназначенной для настройки в принимающем радиометре необходимых входных углов поляризации. Установка состоит из генератора с линейной поляризацией излучаемой волны, ванны с водой размером $0.8 \times 0.8 \text{ м}^2$ и радиометра, установленного на платформу, которая может вращаться вокруг оси диаграммы направленности радиометра. В представляемой схеме в качестве генератора использовался шумовой сигнал от газоразрядной трубки Я5Х-272, излучаемый рупорной антенной с горизонтальной плоско-

стью поляризации. Использование широкополосного сигнала газоразрядной трубки для измерения параметров радиометров, в частности для установки угла поворота поляризаций, является стандартным и объясняется тем, что радиометрический приемник при частоте 36 ГГц обладает входной полосой 2 ГГц.

Точность установки плоскости поляризации при обычной схеме излучения оценивается как $\pm 2^\circ$. Эта величина зависит от точности установки прямоугольного волновода, питающего антенну, свойств излучающей антенны и уровня кроссполяризации, определяющего ортогональную составляющую излучения.

Излучение от излучающей антенны 3 падает на поверхность воды, которая налита в квадратную ванну со сторонами 800 мм, сделанную из прозрачного оргстекла. Угол падения выбирался равным углу Брюстера. Зависимость коэффициентов отражения от угла падения для вертикальной R_v и горизонтальной R_h поляризаций падающего излучения описывается формулами Френеля

$$R_h = \left| \frac{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} - \cos \theta}{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} + \cos \theta} \right|^2, \quad (1)$$

$$R_v = \left| \frac{\epsilon \cdot \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cdot \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2, \quad (2)$$

где $\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' = \epsilon_0 \cdot \exp(i\phi)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности, ϵ_0 – модуль ϵ , ϕ – угол потерь, θ – угол падения. По данным исследования [12] комплексная диэлектрическая проницаемость для пресной воды на частоте 36 ГГц составляет $\epsilon = 21.7 + 29.96i$. На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов отражения R_v и R_h от угла падения для пресной воды.

Видно, что вблизи от угла Брюстера ($\theta = 80.5^\circ$) коэффициент R_h равен 0.91, в то время как $R_v = 0.056$. Несмотря на широкие диаграммы направленности излучателя и приемника ($\Delta\theta = 9^\circ$), интегрирование сигнала на приемнике осуществлялось в центре диаграммы направленности излучающей антенны в интерва-

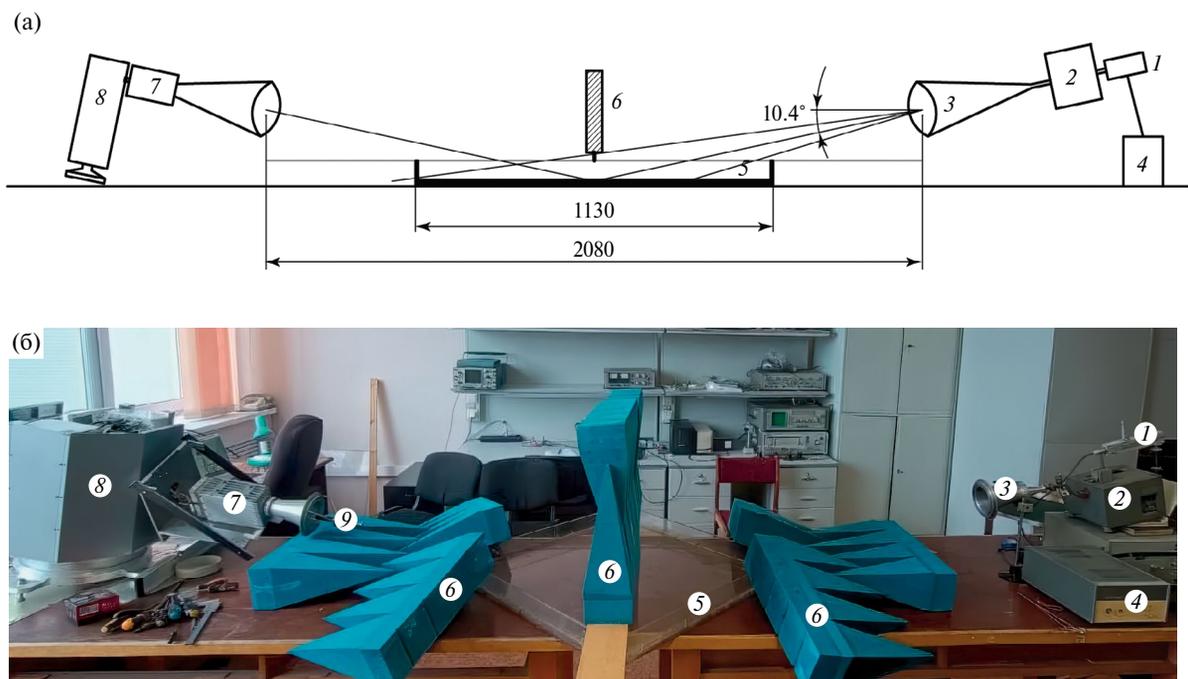


Рис. 1. Схема (вверху) и фотография (внизу) эксперимента: 1 – газоразрядный генератор шума Я5Х-272, 2 – прецизионный аттенюатор ДЗ-36, 3 – скалярная рупорная антенна, 4 – блок питания генератора шума, 5 – ванна с водой, 6 – поглотители микроволнового диапазона, 7 – радиометр с антенной, 8 – поворотное устройство “Траверс-2”, 9 – лазерная указка, установленная для юстировки измерительной системы.

ле углов $\pm 2^\circ$, что обуславливалось отношением диаметра приемной апертуры $D = 140$ мм к расстоянию между излучателем и приемником $L = 2080$ мм. Для определения коэффициентов отражения именно в таком интервале углов падения и нужно интегрировать кривые на рис. 2. В нашем эксперименте угол падения составлял $\theta = 79.6 \pm 2^\circ$, что по сравнению с углом Брюстера немного увеличило коэффициент отражения для вертикальной поляризации до $R_v = 0.058$ и уменьшило коэффициент отражения на горизонтальной поляризации $R_h = 0.9$. Это означает, что в отраженном от водной поверхности излучении вклад вертикальной поляризации уменьшается по сравнению с горизонтальной на -12 дБ. Учтем, что падающее на поверхность излучение уже имеет горизонтальную поляризацию с точностью установки $\pm 3^\circ$. При этом подавление вертикальной составляющей в падающем на поверхность излучении составляет около -20 дБ мощности. Результирующее подавление вертикальной составляющей излучения по отношению к ее горизонтальной части составит более 30 дБ. Таким образом, поверхность воды служит своеобразным поляризационным фильтром для микроволнового излучения.

Главным в данной схеме измерений становится тот факт, что отраженное от воды излучение четко привязано к горизонту, поскольку поверхность воды горизонтальна с точностью не хуже 0.05° . Кроме яркого горизонтально-поляризованного излучения, в диаграмму направленности радиометра попадает и излучение от всех предметов, попадающих в диаграмму. Для того чтобы это фоновое излучение не изменяло результирующую плоскость поляризации, нужно, чтобы фоновое излучение было неполяризованным. Этому условию удовлетворяют поглощающие материалы, которыми мы закрыли все плоскости, на которые может попадать стороннее излучение. Без поглощающего материала оставалась только узкая полоса над водной поверхностью, через которую проходило излучение генератора.

Излучение, отраженное от поверхности воды, попадает на вход антенны радиометра, установленного на поворотной платформе “Траверс-2”, которая используется для лабораторных и экспериментальных работ, связанных с исследованиями морской поверхности и атмосферы [9]. Радиометр представляет собой микроволновый радиометр прямого усиления восьмимиллиме-

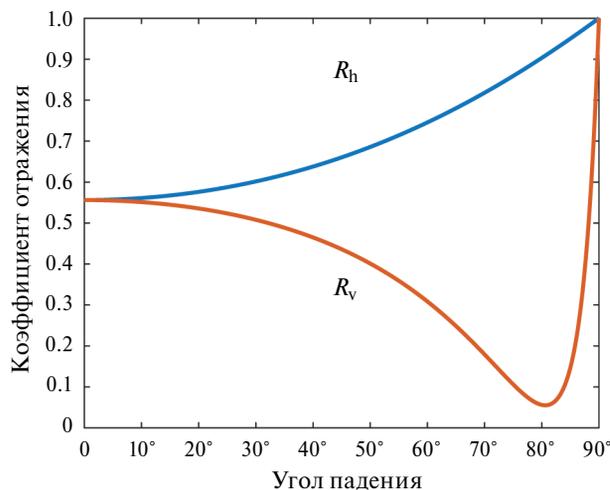


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения R_v и R_h от угла падения для пресной воды.

трового диапазона (центральная частота 36 ГГц, приемная полоса 2 ГГц). Для переключения поляризаций входящего излучения используется ФВПП, установленный на входе радиометра после скорректированной рупорной антенны. ФВПП изготовлен по заказу в НИИ «Феррит-Домен» в Санкт-Петербурге. Типичные параметры ФВПП приведены в табл. 1.

В радиометре предусмотрена возможность работы в нескольких режимах, которые задаются с компьютера перед началом измерений. Возможен прием от одной до четырех линейных поляризаций, повернутых относительно входного волновода на $0, -45^\circ, +45^\circ$ и 90° . Накопление сигнала для всех четырех режимов измерений и запись происходят каждые 333 мс (т.е. с частотой 3 Гц). 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. Дополнительно регистрируются температуры трех термодатчиков, расположенных на модуляторе, СВЧ-усилителе и корпусе радиометра. Чувствительность радиометра в режиме приема всех поляризационных сигналов не хуже 0.1 К для времени накопления 1 с. Более подробно прибор описан в работе [8]. Отметим, что до настоящей работы привязка к горизонту проводилась уровнем, который мог регистрировать положение корпуса струнного поляризатора, но не поляризацию самого излучения.

Таблица 1. Характеристики фарадеевского вращателя поляризаций 8-миллиметрового диапазона в нормальных условиях. Центральная частота: 36.0 ГГц. Полоса частот: ± 1.0 ГГц. В полосе 35.3–7.0 ГГц потери α_{\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
		$\alpha_{\text{ср}}$	α_{min}	α_{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	

При проведении измерений радиометр с помощью поворотной платформы вращался вокруг оси круглого рупора антенны. Диапазон углов вращения составлял около 220°, что вполне хватает для построения поляризационного эллипса. При юстировке схемы измерения использовалась лазерная указка, которая закреплялась на оси рупора радиометра и испускала лазерный луч вдоль оси приема излучения. С помощью такой методики мы визуализировали направление оси вращения радиометра и настроили ее так, чтобы ось принимающего рупора была направлена точно на середину ванны, а излучающий рупор установили так, чтобы лазерный луч после отражения от поверхности попадал точно в центр излучающей антенны. При этом геометрически обеспечивалась точность 0.1° зеркального совмещения осей излучающей антенны и принимающего рупора с переотражением от поверхности воды в центре ванны. Геометрия установки проверялась в начале и в конце серии измерений. При выполнении радиометрических измерений лазерная указка снималась.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы состоит в настройке ячейки Фарадея на входе радиометра таким образом, чтобы в зависимости от тока, проходящего через ячейку, плоскость принимаемой поляризации была строго горизонтальна или составляла угол -45° , $+45^\circ$ или 90° с уровнем горизонта. При этом точность настройки должна быть не хуже 0.3°.

Положение плоскости поляризации радиометра рассчитывалось по закону Малюса при

изменении сигнала во время вращения радиометра вокруг оси рупорной антенны. Полный угол поворота радиометра составлял 220°, он регистрировался с помощью внутреннего углового датчика радиометра с точностью 0.1°. При измерениях скорость вращения составляла 1.8°/с. Одно измерение состояло из вращения в одну сторону и обратно, что занимало около 4 мин. На рис. 3 в полярных и декартовых координатах представлены графики одного цикла измерений, полученные 16.02.2023 для четырех каналов: при горизонтальной, вертикальной поляризациях и поляризациях, повернутых на углы -45° и $+45^\circ$.

Измеренные данные аппроксимировались законом Малюса, функцией вида $A \cdot \cos^2(\varphi + B) + C$, в которой коэффициент B определял угол установки плоскости поляризации у данного канала радиометра. Измерение повторялось несколько раз, определялся средний коэффициент B на каждом канале. Затем проводилась подстройка токов, проходящих через ячейку Фарадея в каждом канале, так чтобы углы B между собой различались на -45° , $+45^\circ$ и 90° .

Ток, протекающий через ФВПП, определялся по напряжению на калиброванном сопротивлении 1 Ом в цепи питания ячейки Фарадея. Напряжение на сопротивлении измерялось прецизионным вольтметром В7–22. На рис. 4 продемонстрирована зависимость угла поворота плоскости поляризации от напряжения при сопротивлении 1 Ом в цепи питания ФВПП. Данные аппроксимируются двумя зависимостями: линейной и полиномом третьей степени. На основе полученной зависимости корректи-

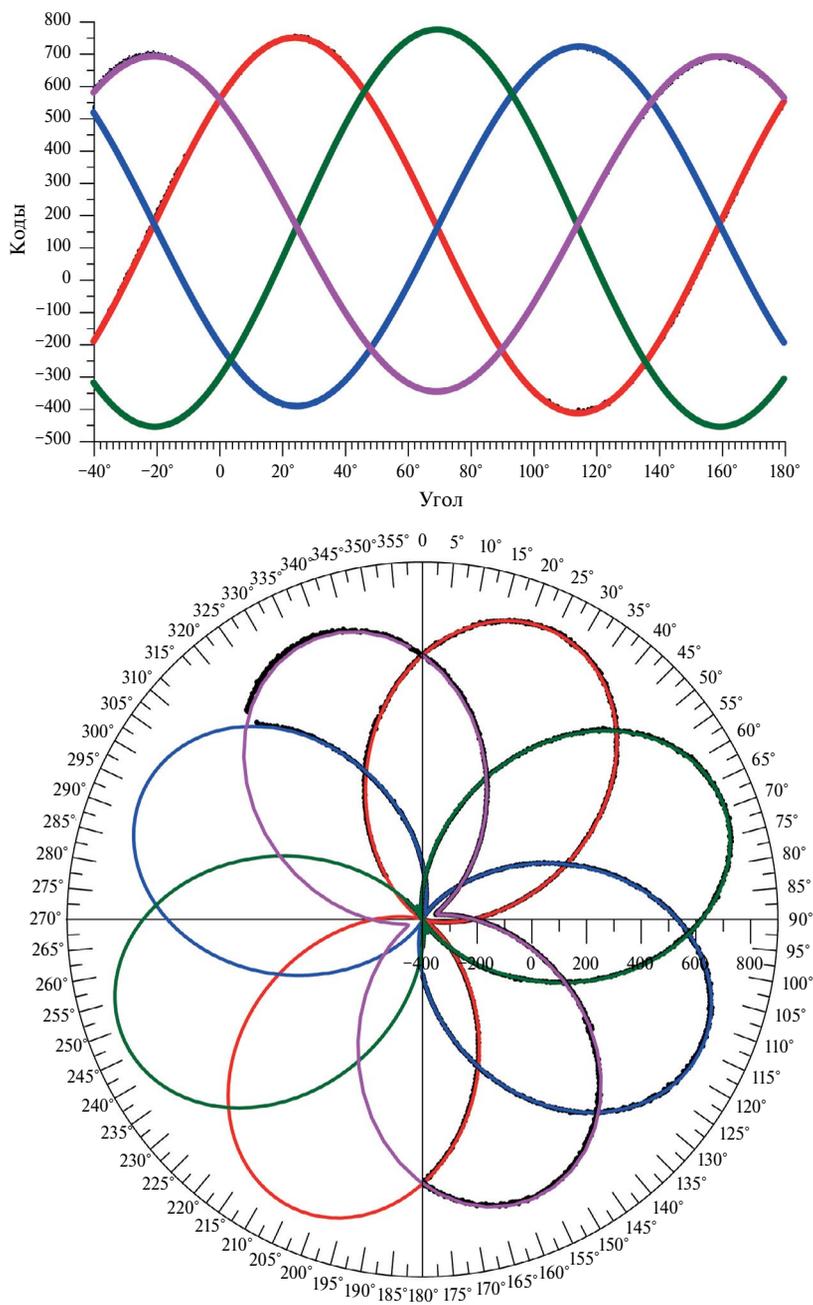


Рис. 3. Пример измерений установки плоскостей поляризации для радиометра R08P1, измеряющего радио-яркостную температуру при горизонтальной (синий цвет), вертикальной (красный) поляризациях и поляризациях, повернутых на 45° (зеленый) и $+45^\circ$ (сиреневый). Измерения проводились 16.02.2023 с переотражением от воды, угол наклона излучателя и приемника $10.4^\circ \pm 0.2^\circ$. Тонкими линиями соответствующих цветов показаны аппроксимации данных функцией $A \cos^2(\varphi + B) + C$. Верхний рисунок приведен в декартовых координатах, нижний – в полярных.

ровался ток в ФВПП для достижения нужных углов установки поляризаций.

Обычно при использовании ФВПП в качестве разделителя поляризаций первый канал соответствует отсутствию тока через ФВПП – это горизонтальная или вертикальная поляризация в зависимости от конструкции радиометра.

Остальные каналы получаются путем пропускания определенного тока через ФВПП для получения угла поворота плоскости поляризации -45° , $+45^\circ$, 90° . Однако настройка ячейки Фарадея с использованием области нулевых токов и токов, смещающих поляризацию на заданные углы, оказалась весьма затрудни-

тельной. При таких токах оказалась почти невозможной точная подстройка плоскости поляризации на небольшие углы (0.2° – 0.5°) – углы смещались рывком на 2° – 3° при плавном изменении тока. Мы предположили, что в процессе длительной эксплуатации (в течение более 10 лет и тысяч часов работы) при данных токах в ферритовом сердечнике формируется определенный гистерезис, при котором управление ячейкой становится затруднительным. В ферритовой структуре сердечника при длительной работе на фиксированных токах, по-видимому, сформировались потенциальные ямки, которые нарушили линейный характер зависимости угла поворота плоскости поляризации от тока. Опыт показал, что при нулевом токе в ФВПП присутствует остаточная намагниченность ферритового сердечника, которая смещает угол поляризации первого канала на несколько градусов, поэтому приходится в этом канале также вводить подстройку угла установки поляризации небольшим током. При этом характеристики ячейки в этой области становятся нелинейными.

Было решено сместить рабочие точки ячейки в другое положение. Выбор остановился на токах в окрестности значений ± 30 и ± 80 мА. На рис. 4 выбранные режимы показаны крупными точками. Оказалось, что линейность ячейки Фарадея в окрестности таких управляющих токов сохранилась и стала возможна тонкая настройка плоскости поляризации радиометров. На последней итерации настройки были получены следующие значения для разницы установленных углов поляризации: -45.29° , $+44.75^\circ$, 90.04° . Среднюю погрешность установки углов поляризации в наших экспериментах мы оцениваем уровнем не ниже $\pm 0.3^\circ$. При этом важным фактором является то, что такая настройка имеет абсолютную привязку к уровню горизонта.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе рассматривается способ измерения и установки углов поворота плоскости поляризации для микроволнового радиометра 0 , $+45^\circ$, 90° , -45° с максимальной возможной точностью абсолютной привязки к уровню горизонта. Переключение режимов обеспечивается ячейкой Фарадея. В предлагаемой схеме измерений используется сигнал излучения горизонтальной поляризации, отраженный от водной поверхности при угле

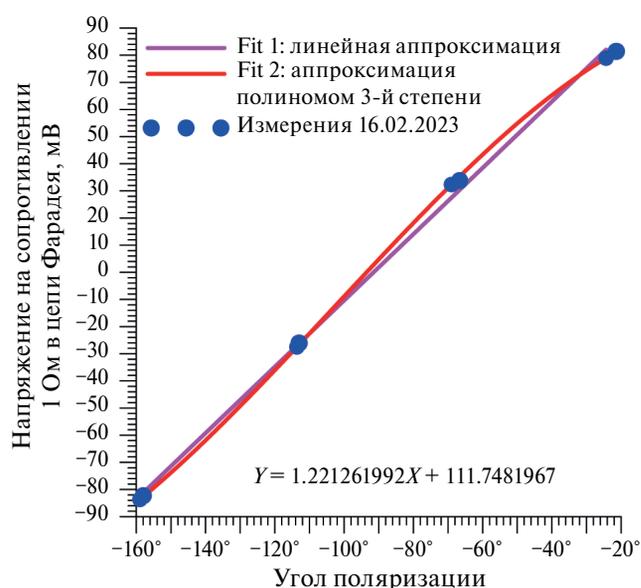


Рис. 4. Зависимость угла поворота плоскости поляризации от напряжения при сопротивлении 1 Ом в цепи питания ФВПП. Данные аппроксимируются двумя зависимостями: линейной и полиномом третьей степени.

Брюстера, что обеспечивает дополнительное подавление вертикальной составляющей излучения на -12 дБ и формирует строго горизонтальную поляризацию отраженной волны. Точность горизонтальности свободной поверхности воды в ванне не хуже 0.05° . В традиционных методах точность установки углов поляризации составляет 1 – 3° , при этом не обеспечивается абсолютная привязка к уровню горизонта. Точность установки плоскостей поляризации в предложенном методе не хуже $\pm 0.3^\circ$ относительно уровня горизонта. В качестве источника сигнала горизонтальной поляризации использовалось электромагнитное шумовое излучение газоразрядной трубки, прошедшее через прямоугольный волновод. Измерение углов установки плоскости поляризации, которые управляются токами через ячейку Фарадея, проводилось посредством вращения радиометра вокруг оси приемной антенны и аппроксимации данных законом Малюса. В работе описана проблема нелинейности зависимости угла поворота плоскости поляризации от протекающего тока (гистерезис), которая возникает при длительной эксплуатации ячейки. Решение заключалось в смещении рабочих токов на линейный участок, что позволило проводить тонкую настройку углов поляризации радиометра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00189.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gaiser P.W., Germain K.St., Twarog E.M., Poe G.A., Purdy W., Richardson D., Grossman W., Jones W.L., Spencer D., Golba G., Mook M., Cleveland J., Choy L., Bevilacqua R.M., Chang P.* // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. V. 42. № 11. P. 2347.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.836867>
2. *Kuzmin A.V., Pospelov M.N.* // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1999. V. 37. № 4. P. 1907.
<https://doi.org/10.1109/36.774703>
3. *Поспелов М.Н., Кузьмин А.В., Трохимовский Ю.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 12. С. 2396.
4. *Kunkee D.B., Poe G.A., Boucher D.J., Swadley. S.D., Hong Y., Wessel J.E., Uliana E.A.* // IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2008. V. 46. P. 863.
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.917980>
5. *Имаока К., Маэда Т., Качи М., Касихара М., Ито Н., Накэгава К.* // Proc. SPIE 8528. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II. 2012. P. 852815.
<https://doi.org/10.1117/12.977774>
6. *Sterlyadkin V.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V.* // J Atmos Ocean Technol. 2021. V. 38. № 8. P. 1415.
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
7. *Стерлядкин В.В., Куликовский К.В.* // Russian Technological J. 2022. Т. 10. № 5. С. 100.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>
8. *Анискович В.М., Кузьмин А.В., Сазонов Д.С., Хайкин В.Б.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 213.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223>
9. *Кузьмин А.В., Садовский И.Н., Горшков А.А., Ермаков Д.М.* // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 83.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010054>
10. *Sterlyadkin V.V.* // Advances in Space Research. 2018. V. 62. № 11. P. 3162.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.040>
11. *Стерлядкин В.В. Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Шарков Е.А.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 29.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41>
12. *Barthel J., Bachhuber K., Buchner R., Hetzenauer H., Kleebauer M.* // Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. 1991. V. 95. P. 853.
<https://doi.org/10.1002/bbpc.19910950802>