

Радиометр-поляриметр L-диапазона

С.В. Маречек, М.Т. Смирнов

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: marechek@sunclass.ire.rssi.ru*

Работа посвящена разработке СВЧ-радиометра для измерений параметров подстилающей поверхности в задачах дистанционного зондирования системы «атмосфера – поверхность Земли». Предложена методика обработки измеряемых сигналов радиотеплового излучения для вычисления четырёх параметров поляризации Стокса. Методика основана на интерференционной обработке двух ортогонально поляризованных входных сигналов. Сигналы с выхода антенны поступают непосредственно на блок векторной обработки. Радиометр имеет четыре канала усиления сигналов с выходов блока интерференционной обработки. В каналах присутствуют все компоненты параметров Стокса. Данная методика не требует проводить корреляционную обработку сигналов на последующих этапах. Главное преимущество применения интерференционной методики перед корреляционной методикой заключается в том, что используется принципиально пассивный линейный элемент – векторный сумматор – делитель мощности. Использование интерференционной системы делает более простой и недорогой реализацию трактов усиления и обработки радиометра. Разработана математическая модель, описывающая все преобразования измеренных сигналов. На базе предложенной методики изготовлен радиометр-поляриметр L-диапазона. Даны описания и функциональные схемы основных блоков СВЧ-радиометра. Радиометрические каналы выполнены по классической схеме модуляционного радиометра. Предложена процедура внутренней калибровки радиометра и методика получения параметров эллипса поляризации.

Ключевые слова: радиометр, параметры Стокса, дистанционное зондирование, излучательные характеристики, подстилающая поверхность, атмосфера Земли, температура, влажность, спутники

*Одобрена к печати: 02.06.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-118-127*

Введение

В задачах определения температурно-влажностных профилей атмосферы Земли космическими средствами большое значение имеет знание температуры и излучательных характеристик подстилающей поверхности. Для этих целей, наряду с другими средствами, может быть использован радиометр дециметрового L-диапазона (в районе длины волны 21 см), который может давать нужную информацию о подстилающей поверхности Земли в широком диапазоне метеоусловий, включая условия облачности. Использование L-диапазона представляет большой интерес также в связи с тем, что в этом диапазоне наблюдается высокая чувствительность к вариациям солёности воды и температуры поверхности. Знание полного набора поляризационных характеристик электромагнитных волн дает основу для создания алгоритмов восстановления параметров среды распространения и физических параметров исследуемой подстилающей поверхности по данным как наземного, так и космического пассивного зондирования.

Одной из главных целей данной работы являлась разработка методики и аппаратуры для измерения полного набора параметров поляризации в дециметровом диапазоне. На выходе СВЧ-радиометра получают выходные напряжения, величины которых пропорциональны значениям параметров Стокса.

Методика измерения параметров Стокса в радиометре

В задачах дистанционного зондирования окружающей среды прием радиотеплового излучения осуществляется антенной системой от объектов, расположенных в зоне Фраунгофера. Поэтому излучение, приходящее в антенную систему, представляет собой плоские волны, характеристики которых могут быть полностью описаны вещественными параметрами Стокса. В общем случае они могут быть выражены через комбинации ортогональных составляющих напряженностей электрического поля (Басс, Фукс, 1972):

$$\begin{cases} I = \overline{E_x E_x^*} + \overline{E_y E_y^*}, \\ D = \overline{E_x E_x^*} - \overline{E_y E_y^*}, \\ U = \overline{E_x E_y^*} + \overline{E_y E_x^*}, \\ B = i \left[\overline{E_y E_x^*} - \overline{E_x E_y^*} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Применительно к задачам радиометрии, где интенсивности электромагнитного излучения принято выражать в яркостных температурах, выражения (1) примут вид:

$$\begin{cases} I = T_v + T_h, \\ D = T_v - T_h, \\ U = 2T_c \cos \varphi, \\ B = 2T_c \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

где T_v, T_h – значения яркостных температур на вертикальной и горизонтальной поляризациях; T_c – корреляционная составляющая сигналов вертикальной и горизонтальной поляризаций, выраженная в яркостных температурах; φ – сдвиг по фазе между векторами электрического поля вертикальной и горизонтальной поляризаций.

Из формулы (2) следует, что параметры Стокса могут быть определены из четырех независимых измерений интенсивности излучения. Для получения величин параметров I и D достаточно провести измерения абсолютных значений яркостных температур на двух ортогональных поляризациях, например, горизонтальной и вертикальной. Величины параметров U и B могут быть получены либо путем корреляционной обработки СВЧ-сигналов (Germain et al., 2002; Koistinen et al., 2002; Rotbøll et al., 2001), либо путем выделения из продуктов интерференции СВЧ-сигналов (Маречек, 2008, 2011). В обоих способах обработки используются СВЧ-сигналы вертикальной и горизонтальной поляризаций без сдвига друг относительно друга и со сдвигом по фазе на $\pi / 2$.

Корреляционная обработка сигналов может быть осуществлена или в аналоговом виде с использованием умножителя напряжений (Germain et al., 2002; Koistinen et al., 2002) или программно после оцифровки сигналов сверхбыстрым аналого-цифровым преобразователем (Rotbøll et al., 2001). Точность получаемого результата измерения параметров U и B будет зависеть как от качества умножителя сигналов в корреляторе, так и

в значительной степени от идентичности амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик СВЧ-трактов вертикальной и горизонтальной поляризации приемника. СВЧ-сигналы на выходе каждого из каналов должны иметь достаточно большую амплитуду для осуществления операции перемножения сигналов или их оцифровки. Поэтому коэффициенты усиления каждого из трактов должны быть более 80 дБ. Сделать СВЧ-тракты с такими параметрами чрезвычайно сложно и дорого. Если принять во внимание очень сложную электромагнитную обстановку в дециметровом участке СВЧ-диапазона, то задача усложняется многократно, так как СВЧ-тракты радиометра должны иметь высокую избирательность по соседнему частотному каналу, или должна быть предусмотрена возможность отстройки от помех по частоте.

В предлагаемом радиометре применена интерференционная методика получения сигналов, содержащих параметры U и V . Главное преимущество применения интерференционной методики перед корреляционной методикой заключается в том, что используется принципиально пассивный линейный элемент – векторный сумматор – делитель мощности. Он обладает малыми потерями мощности и может быть легко изготовлен с высокой идентичностью каналов. Возможные очень мощные сигналы-помехи в нем не создают каких-либо комбинационных частот, которые могли бы попасть в рабочую полосу частот приемника. Продукты интерференции можно получить, используя исходные сигналы сколь угодно малого уровня мощности. Все это позволяет получать продукты интерференции сразу после приема сигналов антенной системой. И что особенно важно, в последующих этапах обработки сигналов требуется использовать лишь значения амплитуд и не требуется использовать значения фаз. Последнее обстоятельство существенно снижает требования к идентичности характеристик каждого из четырех каналов. Для получения высокой избирательности можно поставить полосовые фильтры, не обращая при этом внимания на возможные значительные различия фазово-частотных характеристик каналов.

Функциональная схема радиометра изображена на *рис. 1*. Это радиометр модуляционного типа. Конструктивно модулятор размещён на входе блока интерференции, но на упрощённой схеме *рис. 1* он не показан. Радиометр, работающий в режиме измерения параметров Стокса, состоит из антенны 1, блока векторной обработки 2 и четырех приемно-усилительных блоков (ПУБ).

Для постоянных напряжений на выходе ПУБ можно написать:

$$U_V = k_V T_V + C_V, \quad (3)$$

$$U_H = k_H T_H + C_H, \quad (4)$$

$$U_0 = k_V^0 T_V + k_H^0 T_H + k^0 T_0 + C_0, \quad (5)$$

$$U_{90} = k_V^{90} T_V + k_H^{90} T_H + k^{90} T_{90} + C_{90}, \quad (6)$$

где k_i^j – коэффициенты передачи от антенны до выхода каждого ПУБ; T_V – яркостная температура излучения с вертикальной поляризацией; T_H – яркостная температура излучения

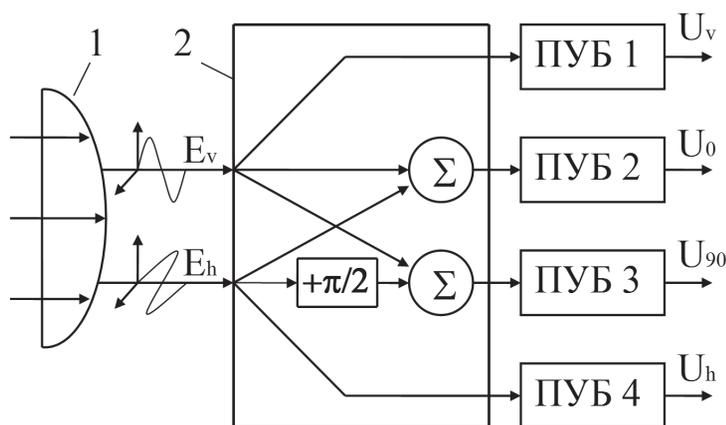


Рис. 1. Функциональная схема радиометра параметров Стокса

с горизонтальной поляризацией; T_0 и T_{90} – температуры интерференции коррелированных частей сигналов вертикальной и горизонтальной поляризаций; C_i – постоянная составляющая каждого из ПУБ.

Температуры интерференции T_0 и T_{90} пропорциональны: $T_0 \sim 2E_v^P E_H^P \cos \varphi$ и $T_{90} \sim 2E_v^P E_H^P \sin \varphi$, где E_v^P, E_H^P – вертикальная и горизонтальная составляющие амплитуды напряженности электрического поля (или напряжения на входе ПУБ) поляризованной части принимаемого излучения; φ – сдвиг по фазе между E_v^P, E_H^P . Для излучения, содержащего поляризованную компоненту, корреляция сигналов не равна нулю и, следовательно, одна из температур интерференции или обе $T_0 \neq 0$ и $T_{90} \neq 0$.

В общем случае поступающее на вход антенны радиотепловое излучение удобно представить в виде суммы мощностей (температур) неполяризованной компоненты (равновероятная поляризация) и поляризованной компоненты (эллиптическая поляризации). Выражения (3–6) примут вид:

$$U_v = k_v(T_v^N + T_v^P) + C_v, \quad (7)$$

$$U_h = k_h(T_h^N + T_h^P) + C_h, \quad (8)$$

$$U_0 = k_v^0(T_v^N + T_v^P) + k_h^0(T_h^N + T_h^P) + k^0 T_0 + C_0, \quad (9)$$

$$U_{90} = k_v^{90}(T_v^N + T_v^P) + k_h^{90}(T_h^N + T_h^P) + k^{90} T_{90} + C_{90}, \quad (10)$$

где T_v^N, T_h^N – мощность (температура) неполяризованной компоненты; T_v^P, T_h^P – мощность (температура) поляризованной компоненты. Температуры интерференции T_0 и T_{90} можно представить в виде: $T_0 = 2\sqrt{T_v^P T_h^P} \cos \varphi$, $T_{90} = 2\sqrt{T_v^P T_h^P} \sin \varphi$.

Для определения значений коэффициентов k_i^j и C_i в (7–10) требуется провести внутреннюю приборную калибровку в три этапа:

Провести измерение выходных напряжений всех четырёх каналов по неполяризованному калиброванному излучению абсолютно чёрного тела. Для неполяризованного излучения температуры интерференции T_0 и T_{90} равны нулю. Равна нулю также мощность (температура) поляризованной компоненты T_v^P, T_h^P . Следует заметить, что T_v^N, T_h^N .

Поэтому обычной калибровкой по двум эталонным излучателям с разной температурой можно из выражений (3–6) или (7–10) определить коэффициенты k_i^j и C_i .

Входы вертикальной и горизонтальной поляризаций радиометра подключить параллельно друг другу и провести измерение выходных напряжений всех четырёх каналов СВЧ. Сдвиг фазы между сигналами в СВЧ-трактах близок к нулю. СВЧ-сигналы, поступающие с двух трактов на сумматор S3 (см. рис. 2), имеют корреляцию, близкую к 100%, и нулевую разность фаз. Повторяя процедуру калибровки предыдущего пункта, можно определить коэффициент k^0 .

Повторяем процедуру калибровки согласно пункту 2, но СВЧ-входы вертикальной и горизонтальной поляризаций радиометра должны быть соединены между собой с помощью четвертьволнового шлейфа. Таким образом обеспечивается сдвиг фазы на 90 градусов между сигналами, поступающими на СВЧ-входы. СВЧ сигналы, поступающие с двух трактов на сумматор S6 (см. рис. 2), имеют корреляцию, близкую к 100%, и нулевую разность фаз. Повторяя процедуру калибровки, описанную в пункте 1, можно определить коэффициент k^{90} .

После проведения указанных выше процедур калибровки в (3–6) известны все коэффициенты k_i^j и C_i , поэтому можно определить численные значения всех температур, входящих в эти выражения. Угол фазового сдвига между векторами E_V^P, E_H^P поляризованной компоненты можно найти из выражения $tg \varphi = T_{90} / T_0$.

Температура неполяризованной компоненты в выражениях (7–10): $T_V^N = T_H^N = T^N$. Калиброванные выражения (7–10) примут вид:

$$T_V = T^N + T_V^P, \quad (11)$$

$$T_H = T^N + T_H^P, \quad (12)$$

$$T_0 = 2T^N + T_V^P + T_H^P + 2\sqrt{T_V^P T_H^P} \cos \varphi, \quad (13)$$

$$T_{90} = 2T^N + T_V^P + T_H^P + 2\sqrt{T_V^P T_H^P} \sin \varphi. \quad (14)$$

Из (11–14) определим значение неполяризованной компоненты, а также вертикальную и горизонтальную составляющие T_V^P, T_H^P поляризованной компоненты:

$$T^N = \frac{T_V + T_H}{2} \pm \frac{1}{2\cos \varphi} \sqrt{(T_V - T_H)^2 \cos^2 \varphi + T_0^2}$$

$$\text{или } T^N = \frac{T_V + T_H}{2} \pm \frac{1}{2\sin \varphi} \sqrt{(T_V - T_H)^2 \sin^2 \varphi + T_{90}^2},$$

$$T_V^P = T_V - T^N \quad \text{и} \quad T_H^P = T_H - T^N.$$

Ортогональные компоненты вещественной части этого вектора можно представить в виде (в дальнейшем верхний индекс будем опускать):

$$E_V^P = E_V = E_V^0 \sin(\omega t - \varphi_V), \quad (15)$$

$$E_H^P = E_H = E_H^0 \cos(\omega t - \varphi_H). \quad (16)$$

Из (15, 16) видно, что конец вектора E с течением времени описывает в плоскости $\{x, y\}$ эллипс, уравнение которого имеет вид:

$$E_H^2 + 2E_H E_V \cos(\varphi_H - \varphi_V) + E_V^2 = (E_H^0 E_V^0)^2 \sin^2(\varphi_H - \varphi_V). \quad (17)$$

Перейдем от координатных осей x, y к новым осям ξ, η , повернутым относительно старой системы координат на угол χ , тогда $x = \xi \cos \chi - \eta \sin \chi$ и $y = \xi \sin \chi + \eta \cos \chi$.

Выберем угол χ таким, чтобы уравнение (17) в новых координатах ξ и η приняло каноническую форму $\frac{E_\xi^2}{a^2} + \frac{E_\eta^2}{b^2} = 1$. Зависимость компонент E_ξ и E_η от времени при этом будет иметь вид $E_\xi = E_0 \cos \beta \cos \omega t$ и $E_\eta = E_0 \sin \beta \sin \omega t$, где $E_0^2 = a^2 + b^2$ и $\operatorname{tg} \beta = b/a$. Положительным значениям β соответствует вращение вектора E против часовой стрелки, а отрицательным – в противоположном направлении. Угол χ между осью x и главной осью ξ этого эллипса определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\chi = \frac{2E_H^0 E_V^0 \cos \varphi}{(E_H^0)^2 - (E_V^0)^2} = \frac{T_0}{T_H^P - T_V^P} = \frac{U}{D}.$$

Угол β , тангенс которого есть отношение полуосей эллипса, характеризует степень эллиптичности и может быть найден по аналогичной формуле:

$$\sin 2\beta = \frac{B}{\sqrt{D^2 + U^2 + B^2}}.$$

Нетрудно убедиться в том, что для эллиптически поляризованной волны параметры Стокса связаны соотношением $I^2 = U^2 + B^2 + D^2$. В этом случае есть всего три независимых параметра из четырех. В противоположном предельном случае совершенно неполяризованного излучения излучение описывается единственным параметром I , а остальные параметры Стокса обращаются в ноль: $D = U = B = 0$.

В общем случае частично поляризованного излучения параметры Стокса:

$$\begin{cases} I = 2T_N + T_H^P + T_V^P \\ D = T_H^P - T_V^P \\ U = \sqrt{2T_H^P T_V^P} \cos \varphi \\ B = \sqrt{2T_H^P T_V^P} \sin \varphi \end{cases}.$$

Поступающее на вход антенны излучение удобно представить в виде суперпозиции эллиптически поляризованной волны и неполяризованной составляющей. Температура неполяризованного излучения равна $I - \sqrt{D^2 + U^2 + B^2}$. Степень поляризации SP связана с параметрами Стокса соотношением $SP = \frac{\sqrt{D^2 + U^2 + B^2}}{I}$.

Блок схема радиометра

Предложенный радиометр может работать в одном из двух режимов:

1. Радиометр модуляционного типа для измерения параметров поляризации Стокса, использующий приемную антенну на две ортогональные поляризации.
2. Четырехканальный радиометр модуляционного типа для панорамных трассовых измерений или других четырехканальных измерений.

Для работы радиометра в режиме четырех независимых каналов блок интерференции отключается. Выходные сигналы от четырех антенн поступают на входы 1 (см. *рис. 3*) соответствующих ПУБ. На входах каждого ПУБ есть свои модуляторы М1, которыми осуществляется управление по входу 2 и согласованные нагрузки R1. В режиме измерения параметров Стокса модуляторы ПУБ не используются.

В режиме измерения параметров Стокса радиотепловое излучение исследуемой области пространства поступает в антенну. Одной из основных функций антенны является выделение сигналов двух взаимно ортогональных поляризаций, приходящих одновременно из исследуемой области пространства. Упрощенная функциональная схема блока векторной обработки СВЧ-сигналов дана на *рис. 2*. Сигналы вертикальной и горизонтальной поляризаций поступают с выходов антенны на СВЧ-входы 1 и 2.

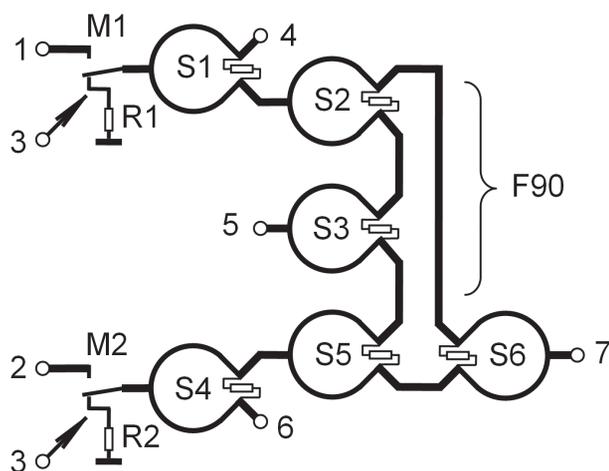


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема векторной обработки СВЧ-сигналов

Далее сигналы модулируются меандром частотой 2 кГц с помощью модуляторов М1 и М2 с управлением по входам 3 и с согласованными нагрузками R1 и R2. Модулированные сигналы поступают на векторные делители мощности S1 и S4, на выходах 4 и 6 имеем мощности сигналов, пропорциональные T_V и T_H . Мощность сигналов со вторых выходов S1 и S4 поступает на векторные делители мощности S2 и S5. Затем сигналы поступают на векторные сумматоры S3 и S6. На векторный сумматор S6 сигнал поступает через линию F90, в которой сигнал получает задержку по фазе на $\pi/2$. Векторные сумматоры S3 и S6 формируют на выходах 5 и 7 сигналы интерференции. Эти сигналы содержат ком-

поненты T_0 и T_{90} . Далее сигналы поступают на вход 1 в ПУБ 1–4, которые выполнены по одинаковым функциональным схемам. Упрощенная функциональная схема обработки СВЧ-сигналов в ПУБ радиометра приведена на *рис. 3*.

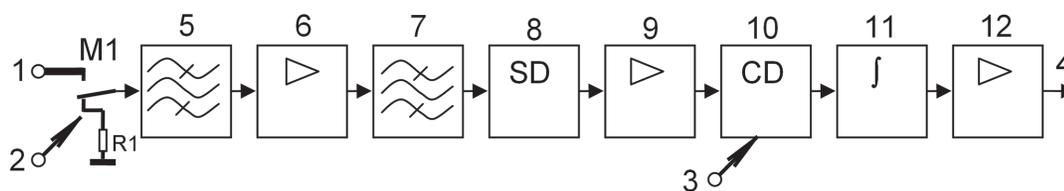


Рис. 3. Функциональная схема ПУБ

Сигнал поступает на вход 1 ПУБ и далее через открытый модулятор М1 проходит через полосовой фильтр 5, усилитель 6, полосовой фильтр 7, квадратичный детектор 8, усилитель частоты модуляции 9, синхронный детектор 10 с управлением на частоте модуляции по входу 3, интегратор 11 и усилитель по постоянному току 12 на выход 4. В дальнейшем напряжения постоянного тока с выходов 4 каждого из ПУБ могут быть направлены в регистрирующее устройство для последующей обработки.

Для обеспечения долговременной и температурной стабильности основных параметров в радиометре использованы вторичные источники питания повышенной точности, а радиометр помещён в термостат. Конструктивно все узлы радиометра закреплены на хорошо проводящей тепло алюминиевой платформе, температура которой стабилизирована. В модуляционном радиометре точность измерения яркостной температуры определяется точностью стабилизации температуры согласованной нагрузки модулятора. Для контроля температуры согласованных нагрузок модуляторов, внутренних блоков радиометра и внешней антенны радиометр оснащён четырьмя электронными термометрами. В них применены линейные датчики температуры, созданные на основе маломощных кремниевых диодов типа КД521 или КД522. Для получения у таких датчиков вольтамперных характеристик с повышенной долговременной стабильностью диоды были подвергнуты специальной термической обработке (своего рода тренировки с искусственным старением).

На *рис. 4* приведена фотография радиометра, в котором для наглядности снята крышка термоизоляционного кожуха.

На переднем плане (*рис. 4*) расположена бухта с двумя датчиками температуры. Ниже даны параметры радиометра (только для справки):

- 1) предусмотрена трансформация схемы, поляриметр Стокса – четыре радиометра;
- 2) частота входного сигнала 1415 МГц;
- 3) флуктуационная чувствительность $0,1^\circ\text{K}\times\text{сек}^{-0,5}$;
- 4) частота модуляции меандром 2 кГц;
- 5) электронные датчики температуры – 4 штуки, доступные для внешнего применения – 3 штуки;
- 6) напряжение питания от 11В до 15 В;

- 7) ток потребления от 0,5 до 1,2 А;
- 8) диапазон возможной установки температуры термостата от -50 °С до +50 °С;
- 9) габариты корпуса 350×165×85 мм;
- 10) вес радиометра без кабелей и антенны – 3 кг.

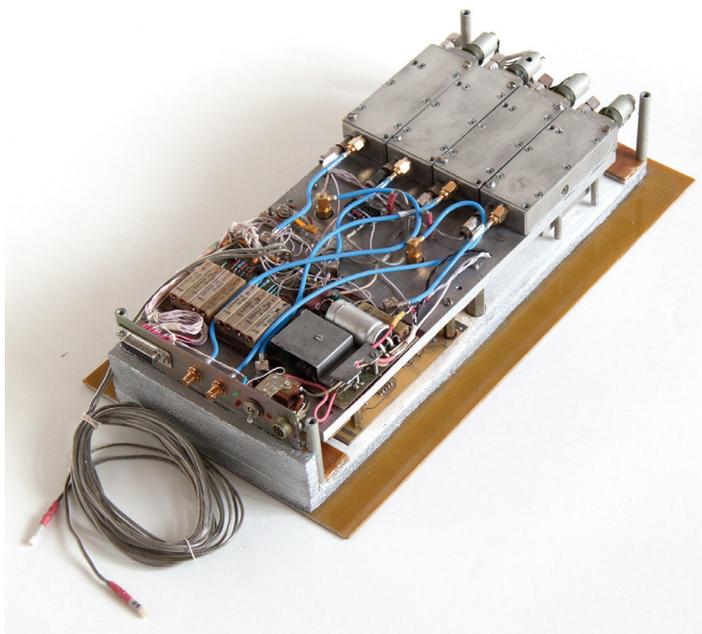


Рис. 4. Фото радиометра-поляриметра со снятой крышкой термоизоляционного кожуха

Выводы

Предложенная методика обработки сигналов и разработанная на её основе функциональная схема были успешно воплощены в радиометре L-диапазона для измерения параметров поляризации Стокса. Полосковая конструкция блока векторной обработки эффективно, с пренебрежимо малыми амплитудно-фазовыми искажениями, в соответствии с предложенной методикой формирует сигналы, содержащие компоненты параметров Стокса. Важной особенностью прибора является то, что он реализован при использовании относительно простых и недорогих технологий. Использование L-диапазона при создании радиометра позволило широко использовать радиодетали и другие электронные компоненты массового производства, что обеспечило низкую стоимость готового изделия.

Конструкция позволяет в полевых условиях трансформировать радиометр-поляриметр параметров Стокса в четыре независимых одноканальных радиометра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-07-00956 а.

Литература

1. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. Маречек С.В. Интерференционный радиометр-поляриметр // ПТЭ. 2008. № 4. С. 64–70.
3. Маречек С.В. Перспективы понижения рисков путем использования радиометров L-диапазона в системах мониторинга районов зарождения тропических циклонов // Экологические системы и приборы. 2011. № 1. С. 24–29.
4. Germain K.St., Poe G.A., Gaiser P.W. Polarimetric emission model of the sea at microwave frequencies and comparison with measurements // Progress In Electromagnetics Research. 2002. PIER 37. P. 1–30.
5. Koistinen O., Lahtinen J., Hallikainen M., Comparison of analog continuum correlators for remote sensing and radio astronomy // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2002. Vol. 51. P. 227–234.
6. Rotbøll J., Søbjaerg S.S., Skou N. L-band polarimetric correlation radiometer with subharmonic sampling // Proc. 2001 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia. 2001. P. 1571–1574.

L-band radiometer-polarimeter

S.V. Marechek, M.T. Smirnov

V.A. Kotelnikov FIRE RAS, Moscow Region, Fryazino 141190, Russia

E-mail: marechek@sunclass.ire.rssi.ru

The work is devoted to the development of a microwave radiometer for measuring parameters of the underlying surface in remote sensing of “atmosphere – Earth surface” system. A technique for processing the measured microwave radiation signals to calculate four Stokes polarization parameters is proposed. The technique is based on interference processing of two orthogonally polarized input signals. The signals from the antenna output are fed directly to the vector processing unit. The radiometer has four channels for amplifying the signals from the outputs of the interference processing unit. The channels contain all the components of the Stokes parameters. No signal correlation processing at subsequent stages is required. The main advantage of using the interference technique against the correlation technique is that fundamentally passive linear element is used – vector power adder – divider. The use of the interference system makes it easier and less expensive to implement the amplification and processing paths of the radiometer. A mathematical model describing all transformations of the measured signals is developed. Based on the proposed technique, L-band radiometer-polarimeter was made. The descriptions and functional diagrams of the main units of the microwave radiometer are presented. The radiometric channels are made according to the classical scheme of modulation radiometer. The procedure for internal calibration of the radiometer and the method for obtaining the parameters of the polarization ellipse are proposed.

Keywords: radiometer, Stokes parameters, remote sensing, radiative characteristics, underlying surface, the Earth’s atmosphere, temperature, humidity, satellites

Accepted: 02.06.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-118-127

References

1. Bass F.G., Fuks I.M., *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Scattering of waves on statistically rough surface), Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
2. Marechek S.V., *Interferentsionnyi radiometr-polyarimetr* (Interferometric radiometer-polarimeter), *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, No. 4, pp. 64–70.
3. Marechek S.V., *Perspektivy ponizheniya riskov putem ispol'zovaniya radiometrov L-diapazona v sistemakh monitoringa raionov zarozhdeniya tropicheskikh tsiklonov* (Prospects of risk mitigation by usage of L-band radiometers in systems of monitoring of tropical cyclones origin areas), *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2011, No. 1, pp. 24–29.
4. Germain K.St., Poe G.A., Gaiser P.W., Polarimetric emission model of the sea at microwave frequencies and comparison with measurements, *Progress In Electromagnetics Research*, 2002, PIER 37, pp. 1–30.
5. Koistinen O., Lahtinen J., Hallikainen M., Comparison of analog continuum correlators for remote sensing and radio astronomy, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2002, Vol. 51, pp. 227–234.
6. Rotbøll J., Søbjaerg S.S., Skou N., L-band polarimetric correlation radiometer with subharmonic sampling, *IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australia, Proc. 2001, pp. 1571–1574.