

Электродинамика и антенные системы

УДК 621.396.67

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЧАСТОТНОЙ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ростокин Илья Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru.

Федосеева Елена Валерьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Федосеев Антон Андреевич

студент Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru.
Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: Рассмотрены вопросы построения многочастотной СВЧ-радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы, реализующей метод компенсации влияния фонового излучения на результаты радиометрических измерений при формировании сигнала компенсации на выходе дополнительного канала антенной системы со специальной формой диаграммы направленности (ДН) и разностного алгоритма выделения информационной составляющей входного сигнала.

Ключевые слова: многочастотная СВЧ-радиометрическая система, дистанционное зондирование атмосферы, компенсация фоновых помех

Введение

Методы СВЧ радиометрии позволяют выполнять дистанционные измерения метеопараметров облачной атмосферы (влагозапас и водозапас) и являются важной составляющей общего комплекса наблюдений за атмосферой с последующим решением задач прогнозирования погодных явлений [1-6]. Решение многопараметрических задач определения параметров облачной атмосферы основано на использовании результатов спектральных радиометрических измерений, в частности, данных на частотах, выбираемых из условия оптимальности при минимизации погрешности измерения.

При исследовании атмосферы со слоистой структурой облаками для определения влагосодержания и влажности, согласно [2, 4], оптимальными являются длины волн 1,4 см и 0,9 см. Для определения водозаписа конвективных облаков спектральный состав частотных диапазонов измерений зависит от стадии развития облака. Оптимальная длина волны принимаемого радишумового излучения на начальной стадии зарождения облака при малых значениях водозаписа должна быть выбрана в диапазоне 0,2 – 0,4 см, а для исследования переохлаждённых зон облаков с максимально возможным значением влажности оптимальная

длина волны возрастает до 2 см. Для решения задач восстановления полей водности облака и определения интенсивности дождя применяется несколько длин волн из диапазона 3 – 5 см, а при больших значениях интенсивности дождя длина волны должна быть более 5 см.

Для измерения метеопараметров атмосферы с различной облачной структурой необходимо выполнять приём радишумового излучения в нескольких частотных диапазонах. Поэтому построение многочастотных СВЧ радиометрических систем является перспективным направлением развития аппаратуры дистанционного зондирования атмосферы.

Первичной измеряемой величиной в СВЧ радиометрических системах является радиояркость температура принятого излучения, поэтому погрешность её измерения, в конечном счете, определяет точность решения обратных задач определения параметров и достоверность выполняемых на их основе прогнозов. При проведении СВЧ радиометрических измерений

окружающее систему пространство оказывает внешнее помеховое воздействие путем формирования недетерминированного прироста входного сигнала, обусловленного приёмом радишумового излучения из области рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны. Для уменьшения этого помехового влияния применяют методы компенсации помеховой компоненты входного сигнала [7-9].

При измерении радиояркого контраста локальных неоднородностей в атмосфере применяется метод диаграммной модуляции [10], реализующий разностный алгоритм компенсации – при нахождении разности выходных сигналов системы при приёме радишумового излучения с двух угловых направлений - на область исследования и на область, свободную от измеряемого атмосферного образования. Метод диаграммной модуляции неприменим при дистанционных исследованиях протяжённо однородной по структуре атмосферы. В этом случае необходимо отдельно сформиро-

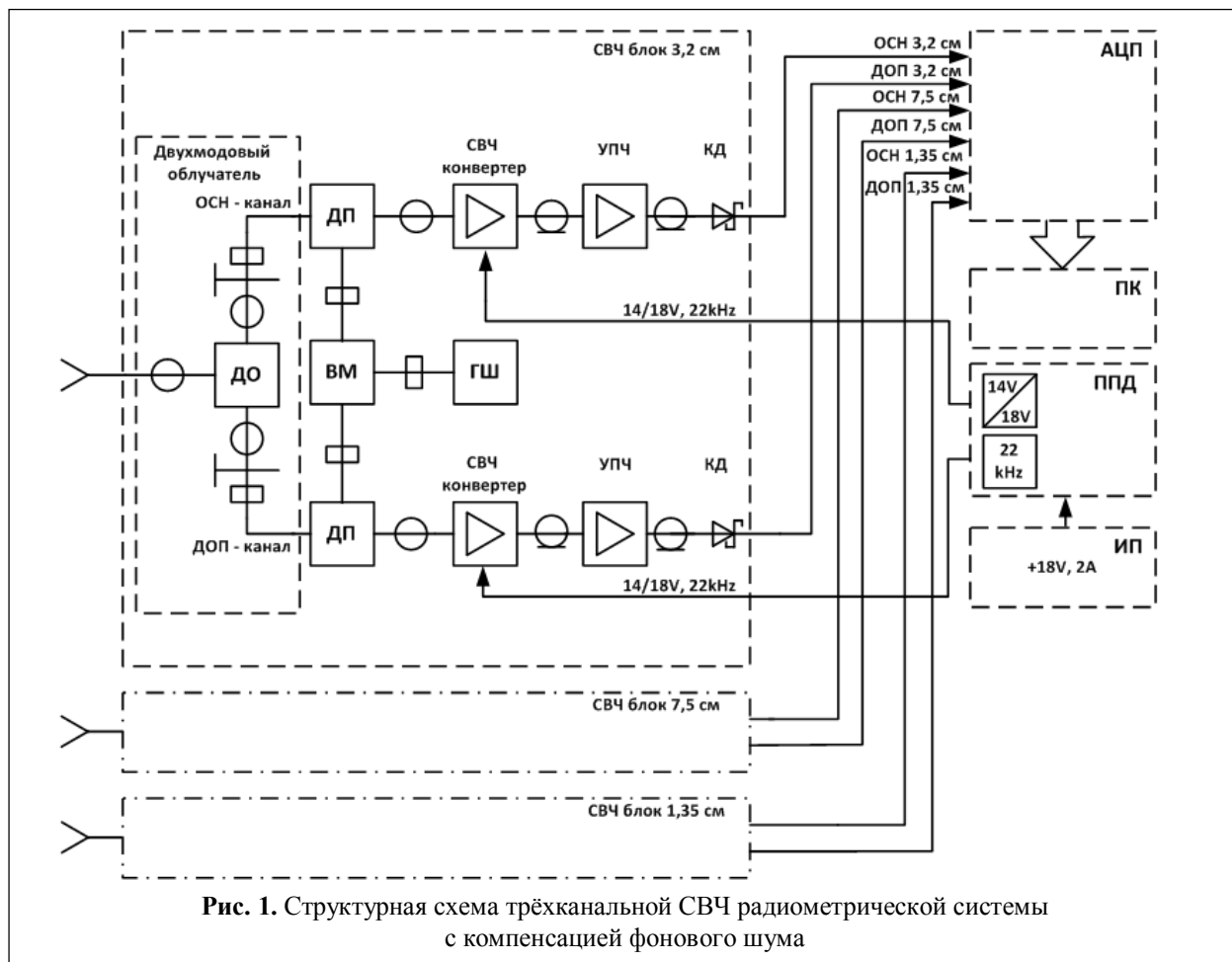


Рис. 1. Структурная схема трёхканальной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фонового шума

вать сигнал компенсации при адекватном основном сигналу приёме из области рассеяния ДН антенны.

В [11-14] рассмотрен способ компенсации помеховой составляющей входного сигнала СВЧ радиометрической системы при формировании на выходе антенны дополнительного сигнала с последующим нахождением разности двух входных сигналов.

При построении многочастотной СВЧ радиометрической системы исследования облачной атмосферы возникла необходимость решить следующие задачи:

- разработать структуру многочастотной СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых помех в каждом канале;
- разработать двухканальные антенны с дополнительным антенным каналом компенсации во всех выбранных частотных диапазонах, провести математическое моделирование и экспериментальное исследование направленных свойств антенн;
- выбрать состав СВЧ приёмных блоков каждого частотного диапазона;
- разработать техническую реализацию процесса внутренней калибровки в СВЧ приёмном блоке каждого частотного диапазона;
- выбрать и реализовать способ последетекторной обработки выходных сигналов и процедуры компенсации помеховых составляющих входных сигналов.

Приём осуществляется на специально изготовленную антенную систему с электромеханическим сканированием в угломестной (от 0° до 90°) и азимутальной (от 0° до 180°) плоскостях.

В качестве основы приёмника СВЧ радиометрической системы были использованы современные СВЧ конверторные модули с параметрами, значения которых приведены в таблице.

Таблица.

Длина волны диапазона, см.	1,35	2,7	7,5
Нижняя частота рабочего диапазона, ГГц	21,56	10,7	3,4
Верхняя частота рабочего диапазона, ГГц	22,35	11,7	4,2
Шумовая температура, К	101	13	13
Коэффициент усиления, дБ	53	60	60

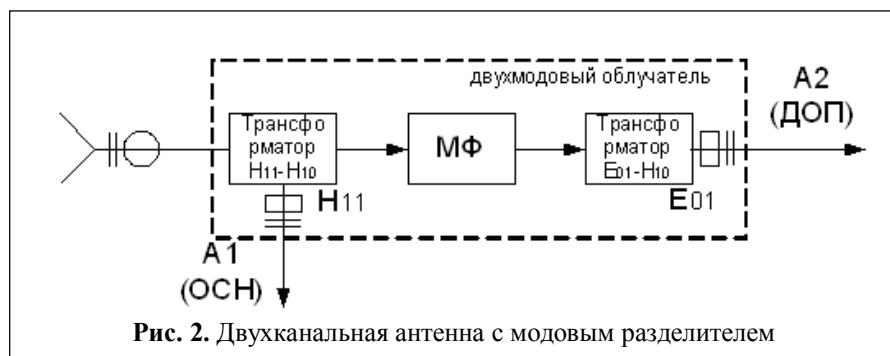
Процедура калибровки СВЧ радиометров каждого частотного диапазона производится путём подачи калибровочного уровня ($T_{\text{КАЛ}} = 400^\circ\text{K}$) шумового сигнала от генератора шума (ГШ) через плавный аттенуатор (АТТ) ($L_{\text{АТТ}} = 0 \dots 30$ дБ), волноводный Т-мост и делитель поляризации на вход СВЧ приёмника при приёме вертикальной поляризации, в то время как приём радишумового излучения от двухканальной антенны производится на горизонтальной поляризации. Процедурой калибровки сопровождается начало и конец каждого сеанса измерений.

В современных СВЧ конверторах используют двоянные СВЧ-тракты, а излучение горизонтальной и вертикальной поляризаций принимают из круглого входного волновода с помощью двух ортогональных ёмкостных штырей. Первый штырь располагается от короткозамкнутого конца волновода на расстоянии $\lambda/4$, а второй - на расстоянии $3(\lambda/4)$. Переключение поляризации происходит при изменении напряжения питания конвертора с +14 на +18 В. Более низкое напряжение (+14 В) включает вертикальную поляризацию «V», а более высокое - горизонтальную «H». Управление напряжением выбора поляризации осуществляется от блока переключателя поляризации и диапазона (ПДП).

В системе программно реализуется разностный алгоритм выделения информационной составляющей входного сигнала по оцифрованным данным измерений. Для этого с каждого приёмного блока СВЧ радиометрической системы выходные сигналы с квадратичных детекторов основного и дополнительного канала поступают на специальный многоканальный АЦП и далее на компьютер, где реализуется процедура нахождения разности сигналов.

Двухканальные антенны СВЧ-радиометрической системы

Основное требование к антенне каждого из трёх частотных каналов радиометрической системы - формирование двух выходных сигналов: основного измерительного и дополнительного сигнала компенсации, уровень которого в основном определяется адекватным ос-



см, для диапазона 3,2 см – диаметр питающего волновода 3,2 см, диаметр рупора – 12,0 см. Результаты расчета ДН указанных антенн для двух каналов (1 - основного измерительного, 2 – дополнительного формирования сигнала компенсации)

новному каналу приёмом ради шумового сигнала через область рассеяния ДН основного антенного канала. Реализация двухканального приёма с указанными характеристиками возможна при работе в двухмодовом режиме – на модах H_{11} и E_{01} круглого волновода с последующим разделением мод в приёмном питающем волноводе антенны (в модовом разделителе).

Модовый разделитель каждого канала (рис. 2) выполнен на основе круглого волновода, к которому подключены два волновода – выходы антенны. Первый антенный канал (A1) в совокупности с круглым волноводом является выходом антенны, осуществляющей приём на волне H_{11} , а второй антенный канал (A2) – на волне E_{01} .

Антенна работает следующим образом: шумовой сигнал, принимаемый коническим рупором, поступает в круглый волновод, в котором возбуждаются волны H_{11} и E_{01} . В трансформаторе типов волн $H_{11} \rightarrow H_{10}$ – прямоугольном окне, широкая стенка которого параллельна оси круглого волновода и с размерами, ограниченными поперечно подключённым прямоугольным волноводом, осуществляется ответвление энергии, переносимой волной H_{11} и подача её на выход основного антенного канала [6, 7].

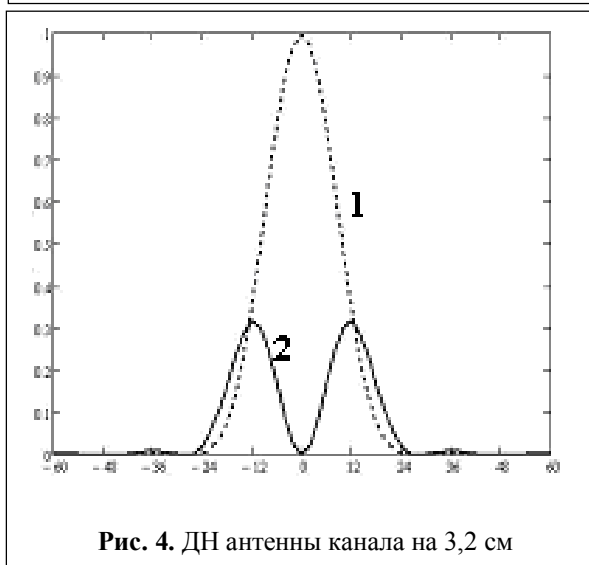
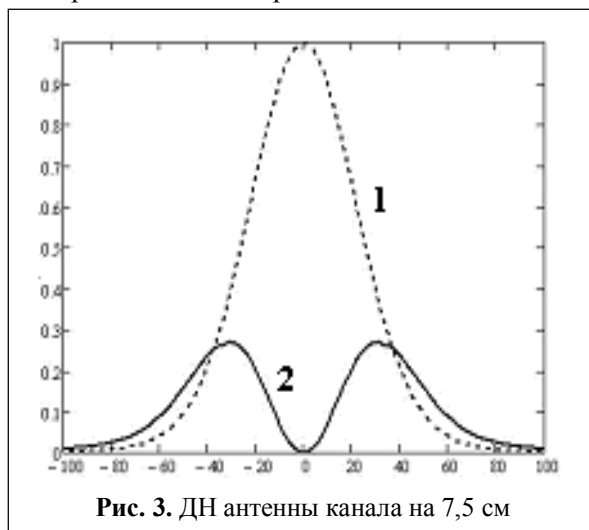
Направленные свойства двухканальных двухмодовых антенн

Для многочастотной СВЧ-радиометрической системы, осуществляющей измерения ради шумового излучения атмосферы в диапазонах длин волн 1,35 см; 2,7 см и 7,5 см, были разработаны и изготовлены рупорные антенны с модовыми разделителями.

Для диапазона 1,35 см диаметр питающего волновода равен 1,35 см, а диаметр излучающего раскрыва рупора - 5,6 см, для диапазона 7,5 см – диаметр питающего волновода 7,1 см, диаметр излучающего раскрыва рупора - 10,2

представлены на рис. 3 – 5.

Результаты экспериментальных измерений ДН двухканальных антенн по радиотепловому излучению полупроводниковых ГШ на ЛПД, используемых в качестве точечного излучателя, находящегося в ближней зоне антенны СВЧ радиометра, в соответствующих диапазонах представлены на рис. 6 – 8.



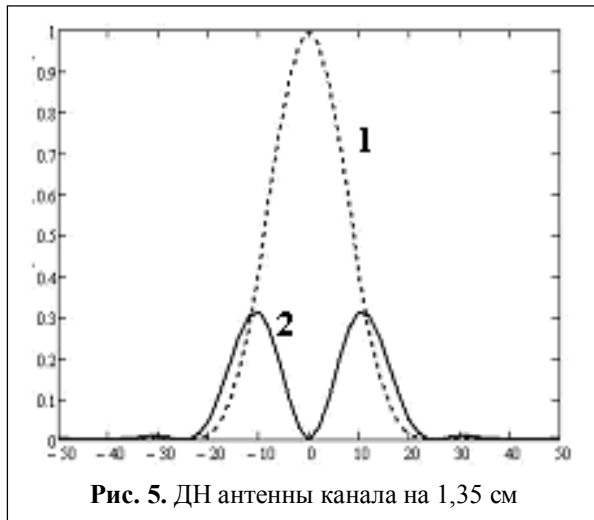


Рис. 5. ДН антенны канала на 1,35 см

Кроме численного моделирования ДН двухканальных антенн было выполнено экспериментальное исследование их направленных свойств. В экспериментах использовались полупроводниковые генераторы шума производства НПП «Исток» М31305-1 для диапазонов 7,5 см и 2,7 см, М31305-4 для диапазона 1,35 см. Генерируемая шумовая мощность достигает 33 дБ относительно kT_0 . Спектральная плотность мощности шума ГШ изменялась с помощью волноводного плавного аттенюатора от 0 до -30 дБ. Результаты измерений приведены на рис. 6-8.

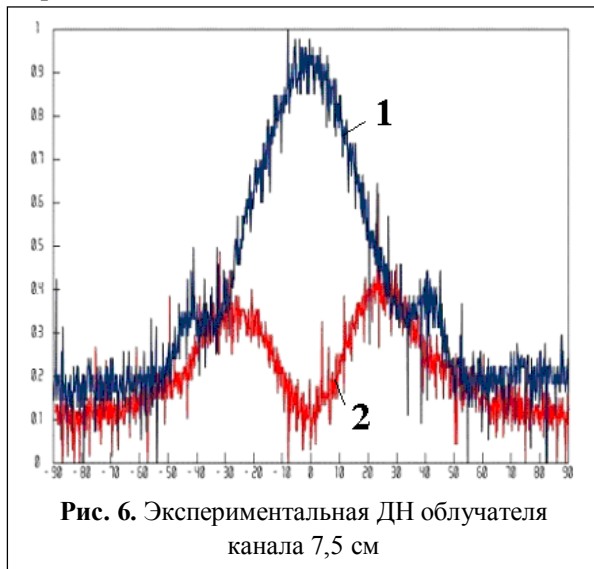


Рис. 6. Экспериментальная ДН облучателя канала 7,5 см

Результаты экспериментальных исследований направленных свойств двухканальных антенн показали хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных, что подтвердило возможность реализации требуемых характери-

стик направленности для формирования сигналов компенсации адекватных помеховым составляющим входных сигналов системы в трех указанных частотных диапазонах.

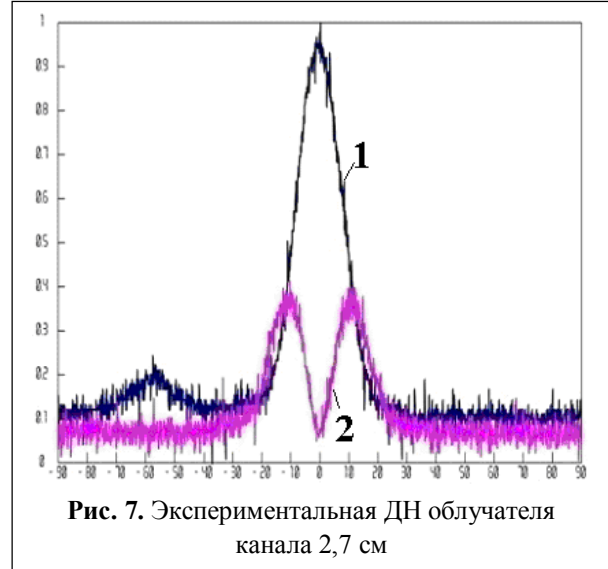


Рис. 7. Экспериментальная ДН облучателя канала 2,7 см

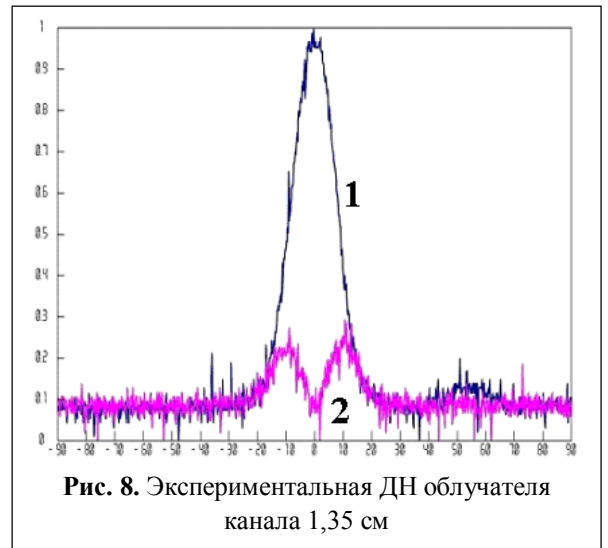


Рис. 8. Экспериментальная ДН облучателя канала 1,35 см

Заключение

В представленной трёхчастотной СВЧ - радиометрической системе решена задача компенсации влияния фоновых шумов при включении в состав приёмного блока в каждом частотном диапазоне двухканальной антенны и реализации компенсационного принципа приёма радиошумового излучения, что позволяет применить данную систему для измерений любой пространственно однородной или неоднородной атмосферы, осуществить исследование пространственной структуры выделенной области атмосферы путём проведения

измерений при различных углах возвышения на разных частотах, что расширит возможности для оперативной оценки геофизических параметров атмосферы и построения прогнозов развития атмосферных процессов.

Литература

1. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 283 с.
2. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках // Тр. НИЦ ДЗА. Сер. Прикладная Метеорология. - 2004. - Вып.5 (533). - С. 99-120.
3. Абшаев М.Т., Кармов Х.Н. Обнаружение градовых очагов радиолокационно-радиометрическим методом // Тр. IV Всесоюзного совещ. по радиометеорологии. - 1978. - С. 81-87.
4. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. - 2003. - 38, 4, 8079.
5. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere // T.Rose, et.al. Atmospheric Reseach. - 2005. - P. 183-200.
6. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. Микроволновое радиометрическое зондирование системы «атмосфера – подстилающая поверхность» // Вопросы радиометеорологии. - СПб.: - 2013. - С. 173-192.
7. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: моногр. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. – 104 с.
8. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г. Погрешность абсолютных радиотеплолокационных измерений при

неоднородном фоновом шуме // Научный вестник МГТУ ГА. – Выпуск 186. – С. 43 – 48.

9. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г. Оценка влияния неточности компенсации фонового шума на погрешность относительных радиотеплолокационных измерений // Научный вестник МГТУ ГА. – Выпуск 186. – С. 58 – 61.

10. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. / Пер. с англ. Под ред. В.В. Железнякова – М.: Сов. радио. - 1973.– 456 с.

11. Патент РФ №2300831. Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна / Е.В. Федосеева, Е.А. Росточкина, И.Н. Ростокин. Оpubл.: 10.06.2007 Бюл. №16.

12. Патент ПМ №98820. Радиометрическая система с компенсацией внешних помех и нестабильности коэффициента передачи системы / Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, П.А. Ечин. Оpubл.: 27.10.2010. Бюл. №30.

13. Патент ПМ №122185. Модуляционный радиометр двухканальной радиометрической системы с программно-аппаратным модулем / Е.В. Федосеева, П.А. Ечин, И.Н. Ростокин, А.А. Молотков, А.А. Федосеев. Оpubл.: 20.11.2012. Бюл. №32.

14. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Росточкина Е.А. Радиометрическая система дистанционного зондирования атмосферы // Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Сб. докладов III Всероссийской научной конференции (Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г.). – Муром: Изд.-пол. центр МИ ВлГУ. - 2010. – с. 263 - 266.

15. Yong Han, Westwater Ed R. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. - Vol. 38, no.3. - P. 1260-1276.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-02-97507 р_центр_а и №14-02-97510 р_центр_а.

Поступила 31 октября 2014 г.

English

Problems of development of microwave multi frequency - the radiometric system of a remote sensing of a cloudy atmosphere with background radiation compensation

Ilya Nikolaevich Rostokin– Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Monitoring and Control in Technical Systems Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru.

Elena Valerjevna Fedoseeva– Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Radio Engineering Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

Anton Andreevich Fedoseev – Student Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru.

Address: Orlovskaya st., 23, Murom, 602264, Russia.

Abstract: Microwave three-frequency radiometric system of probing cloudy atmosphere with wave lengths of 1.35 sm, 2.7 sm 7.5 sm is proposed as per the results of analysis of multi frequent capabilities of microwave frequency radiometric investigation of cloudy formations in the atmosphere. Compensation of background noise formed in receiving radio noise radiation of the antenna environment through the dispersion area of antenna directional pattern is provided in the system to ensure equal conditions of measurements at different frequencies. Compensation of background noise is performed on the basis of two-channel reception with forming a complementary compensation signal when receiving background radiation only from the dispersion area of the antenna pattern and routine accomplishment of finding differences of two input signals of the system. Extraction of the information component of an input signal of the radiometric system irrespective of the cloudiness structure type (locally inhomogeneous or homogeneous atmosphere) is thus ensured. The skeleton diagram of the radiometric system with program implementation routine of compensation of interference components of input signals after digitization of the measurement data in a special multi-channel analog-to-digital converter is given. Receiving units of three-frequency radiometric system are implemented on the basis of microwave frequency converters, noise parameters which allow to value sensitivity of radiometric system are given. The usage of polarization dividers as elements of converters, performing in this case the role of switches is offered to carry out calibration of radiometers by internal noise generator. The internal calibration frequency of the system is specified. Implementation of two-channel antenna on the basis of two-modal radiation source with the special modal divider ensuring separate reception of principle measuring and complementary signal of compensation is considered. The results of numerical modeling and experimental investigation of directional properties of antennas of three frequency ranges are given.

Key words: multi frequency microwave frequency - radiometric system, a remote sensing of the atmosphere, background noise compensation.

References

1. Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu. Radio-heat location in meteorology. - L.: Hidrometeoizdat, 1987. - 283 p.
2. Karavaev D.M., Shchukin G.G. Application of methods of microwave frequency radiometry for the diagnosis of the liquid content moisture in the clouds. - Tr. Research center of DZA. Issue . Applied meteorology. - 2004. - Issue.5 (533). - p.99-120.
3. Abshayev M.T., Karmov H.N. Detection of the nucleation sites for radiolocation-radiometric method. - Works. IV All-Union conference. On radiometeorology. - 1978. - P. 81-87.
4. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. - Radio Science. - 2003. - 38, 4, 8079.
5. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere.- T.Rose, et.al. Atmospheric Reseach. - 2005. - p. 183-200.
6. Karavaev D.M., Shchukin G.G. Microwave radiometric sounding of the system «atmosphere - underlying surface». D.M. Karavayev. - Voprosy radiometeorologii. - SPb. - 2013. - P. 173-192.
7. Fedoseeva E.V., Shchukin G.G. The problems of metrological support of radio-heat location measurements under the conditions of external noise interference: monography. - Murom: IPC MI VIGU, 2012. - 104 p.
8. Fedoseeva E.V., Schukin G.G. Inaccuracies of Absolute Infrared Detection Measurements at Nonhomogeneous Background Noise. - Nauchnyj vestnik MGTU GA. - Vyp. 186. - P. 43-48.
9. Fedoseeva E.V., Shchukin G.G. The Estimation of the Background Noise Cancellation Inaccuracy Effect on the Relative Infrared Detection Inaccuracy. - Nauchnyj vestnik MGTU GA. - Vyp. 186. - P. 58-61.
10. Krauss J. D. Radioastronomy. Transl. from English. Ed. by V.V. Zheleznyakova - M.: Sov. radio. - 1973. - 456 p.
11. Patent of the Russian Federation №2300831. The Method of Antenna Noise Control and the Two-Mode Aperture Antenna. - Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Rostokin I.N. Opubl.: 10.06.2007. Bjul. №16.
12. The patent for the Useful Model №98820 the Radiometric System with Cancellation of External Noises and Instability of System Transmission Ratio. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Echin P.A. Opubl.: 10/27/2010 Bjul. №30.
13. The patent for the Useful Model №122185. Modular radiometer of two channel radiometric system with software-hardware module. - Fedoseeva E.V., Echin P.A., Rostokin I.N., Molotkov A.A, Opubl.: 20.11.2012 Bjul. №30.
14. Rostokin, I.N., Fedoseyeva E.V., Rostokin E.A. Radiometric system of remote sensing the atmosphere. - All-Russia radiophysical scientific readings-conference in the memory of N.A. Armand. Collection of works of III All-Russia scientific conference (Murom, June 28 - July 1, 2010). - Murom: Publ. center of MI VLGU. - 2010. - p. 263-266.
15. Yong Han, Westwater Ed R. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers. - IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. - vol. 38, no.3. - p. 1260-1276.