

# Электродинамика и антенные системы

УДК 621.396.67

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ ДВУХМОДОВОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕГО ПРОСТРАНСТВА

**Ростокина Елена Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры управления и контроля в технических системах Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

*E-mail:* arostokina@yandex.ru.

*Адрес:* 602264, Россия, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, 23.

**Аннотация:** Сформулированы основные принципы формирования диаграммы направленности (ДН) основного антенного канала и дополнительного канала компенсации влияния фонового излучения, на основе которых предложен вариант построения микроволнового двухмодового облучателя многочастотной радиометрической системы с компенсацией фонового излучения. Проведено исследование основных принципов формирования ДН антенной системы многочастотного микроволнового радиометрического измерительного комплекса, основанных на осуществлении приёма на двух ортогональных линейных поляризациях с одновременным формированием сигнала компенсации на выходе дополнительного антенного канала при выполнении поляризационной развязки основных измерительных каналов и развязки основных и дополнительного канала в специальном устройстве – модовом разделителе, работающем в двухмодовом режиме. Представлены результаты практических исследований направленных свойств антенной системы стационарного варианта многочастотной микроволновой радиометрической системы, заключающиеся в измерении экспериментальных диаграмм направленности многочастотной двухмодовой антенной системы по основному измерительному каналу на двух линейных поляризациях (вертикальной и горизонтальной) и дополнительному измерительному каналу с преимущественным приёмом фонового излучения, приходящего по боковым лепесткам.

**Ключевые слова:** микроволновая радиометрия, двухмодовые антенные системы, диаграмма направленности, фоновое излучение, дистанционное зондирование атмосферы.

### Введение

Микроволновая радиометрия является средством пассивного дистанционного зондирования атмосферы и оценки её метеопараметров по результатам измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы, являющегося результатом теплового движения заряженных частиц [1]. Для получения полной информации о состоянии атмосферы в некотором географическом районе требуются данные угловых разрезов – оценок параметров атмосферы при разных углах возвышения антенны [2].

При выполнении измерений при разных углах высоты антенны изменяется помеховый вклад радиощумового излучения окружающего пространства – фонового шумов, принимаемых через область рассеяния диаграммы направ-

ленности (ДН) антенны в выходной сигнал радиометрической системы. В таком случае необходимо решать задачу оценки и компенсации влияния фонового шума на результаты микроволнового радиометрического зондирования атмосферы [3].

### Принципы формирования ДН антенных каналов

Основное требование к антенне каждого из частотных каналов микроволновой радиометрической системы – это формирование двух выходных сигналов: основного измерительного (на двух линейных ортогональных поляризациях) и дополнительного сигнала компенсации, уровень которого в основном определяется адекватным основному каналу приёмом

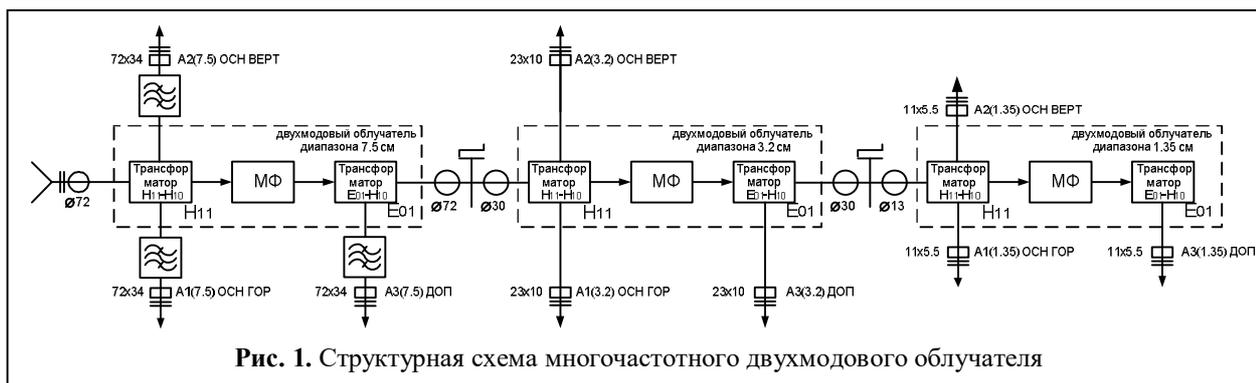


Рис. 1. Структурная схема многочастотного двухмодового облучателя

радиошумового сигнала через область рассеяния ДН основного антенного канала [4].

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) [5].

Модовый разделитель каждого частотного канала (рис. 1) может быть выполнен на основе круглого волновода, к которому подключены три волновода – выходы антенны. Первый и второй антенные каналы ( $A1$  OCH GOR и  $A2$  OCH ВЕРТ) в совокупности с круглым волноводом является выходом антенны, осуществляющей приём на волне  $H_{11}$  на двух ортогональных поляризациях, а третий антенный канал ( $A3$ ) – на волне  $E_{01}$ .

Широкополосный шумовой сигнал поступает в круглый волновод, в котором в трансформаторе типов волн  $H_{11} \rightarrow H_{10}$ , представляющем собой перпендикулярное подключение волновода, например, прямоугольного, к боковой стенке круглого волновода, в которой имеется прямоугольное окно, широкая стенка которого параллельна оси круглого волновода и размеры которого ограничены размерами поперечного сечения подключённого волновода, возбуждаются волны  $H_{11}$  и  $E_{01}$ , осуществляется ответвление энергии, переносимой волной  $H_{11}$ , и подача её на выход второго плеча. Структура поля волны  $E_{01}$  в перпендикулярном плече в виде прямоугольного волновода не может возбудить волну  $H_{10}$ , поскольку соответствующие составляющие вектора  $E$  параллельны узкой

стенке, одинаковы по амплитуде, и направлены в противоположные стороны.

Режекторный фильтр, например, в виде проводящего кольца в поперечном сечении круглого волновода, препятствует прохождению волны  $H_{11}$  и пропускает на вход трансформатора  $E_{01} \rightarrow H_{10}$  только энергию, переносимую волной  $E_{01}$ . Трансформатор типов волн  $E_{01} \rightarrow H_{10}$  представляет, например, перпендикулярное подключение прямоугольного волновода со стороны широкой стенки к круглому волноводу. Таким образом, на выходе трансформатора типов волн (третий канал  $A3$ ) выделяется сигнал, пропорциональный только энергии волны  $E_{01}$ .

Соосное размещение двухмодовых облучателей различных частотных измерительных каналов позволяет осуществить осевую симметрию ДН всех измерительных каналов, что позволит обеспечить наилучшее совмещение ДН в пространстве при проведении микроволновых радиометрических исследований облачной атмосферы методами угломестных и азимутальных разрезов [6].

### Математическое моделирование ДН антенных каналов

Для основного измерительного канала (OCH – канал), работающего на волне  $H_{11}$ , характеристика излучения разделяется на две составляющих, обусловленных электрическим  $\sum_E(\theta, \varphi)$  и магнитным  $\sum_M(\theta, \varphi)$  полем волны

$$\sum_E(\theta, \varphi) = P \frac{\delta}{2\pi\gamma_1 \mu_1^2 (1 - 1/\mu_1^2)} \times$$

$$\times \left[ (1 + \cos \theta \cos \theta_1) \frac{J_1(\delta \sin \theta)}{\sin \theta} \right]^2, \quad (1)$$

$$\sum_M (\theta, \varphi) = P \frac{\mu_1^2}{2\pi\gamma_1 \delta (1 - 1/\mu_1^2)} \times \left[ \frac{J_1'(\delta \sin \theta)}{\cos \theta - \cos \theta_1} \right]^2, \quad (2)$$

где  $\delta = 2\pi a/\lambda$  – безразмерный параметр, связанный с длиной волны  $\lambda$  и диаметром волновода  $a$ ;  $\mu_1 = 1,841$  – критическое значение параметра  $\delta$  для волны  $H_{11}$ ;  $\gamma_1 = \sqrt{\delta^2 - \mu_1^2}$  – безразмерное волновое число для волны  $H_{11}$ ;  $\theta_1$  – угол, связанный с волновым числом соотношением  $k \cos \theta_1 = -\omega_1$ , где  $\omega_1 = \gamma_1/a$  – волновое число;  $J_1(x)$  и  $J_1'(x)$  – функция Бесселя первого порядка и её производная соответственно.

Для дополнительного измерительного канала компенсации (ДОП – канал), работающего на волне  $E_{01}$ , характеристика излучения имеет только одну составляющую, обусловленную электрическим  $\sum_3(\theta, \varphi)$  полем волны, определяемую выражением [8]:

$$\sum_3(\theta, \varphi) = P \frac{\delta}{4\pi\gamma_1} \left[ \frac{\sin \theta J_{01}(\delta \sin \theta)}{\cos \theta - \cos \theta_1} \right]^2, \quad (3)$$

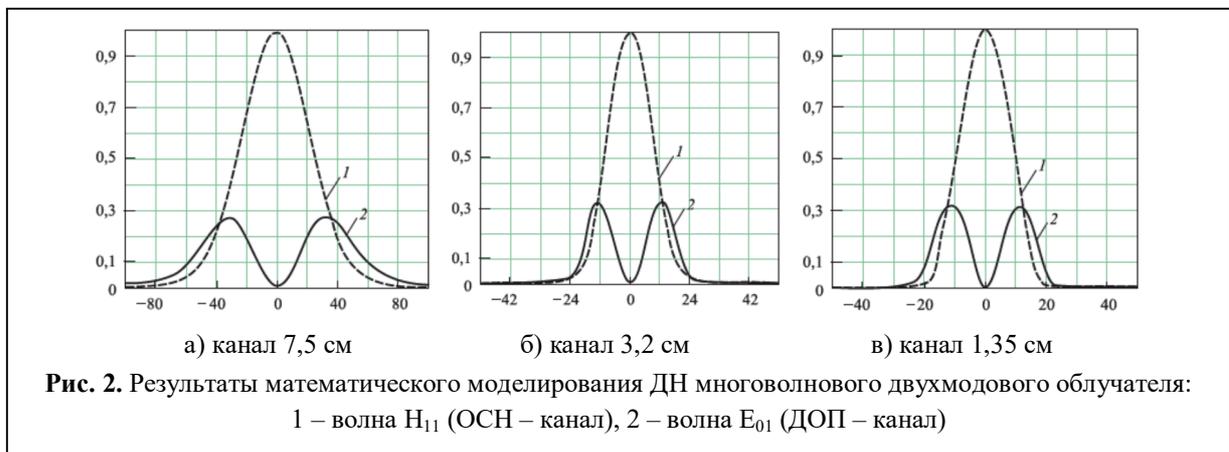
где  $v_1 = 2,405$  – критическое значение параметра  $\delta$  для волны  $E_{01}$ ;  $\gamma_1 = \sqrt{\delta^2 - v_1^2}$  – безразмерное волновое число для волны  $E_{01}$ ;  $\theta_1$  – угол, связанный с волновым числом соотношением  $k \cos \theta_1 = -\omega_1$ , где  $\omega_1 = \gamma_1/a$  – волновое число;  $J_0(x)$  – функция Бесселя нулевого порядка.

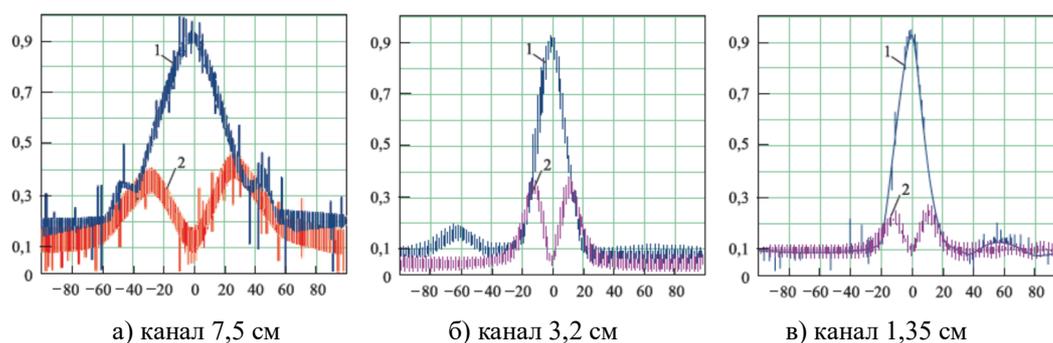
Результаты математического моделирования ДН двухмодового облучателя для трёх измерительных каналов представлены на рис. 2 [7].

Результаты математического моделирования показывают, что: компенсация фонового излучения в радиометрической системе, принимаемого по основному антенному каналу, может быть проведена с высокой степенью точности порядка сотых долей яркостных температур по каждому угловому направлению, причём по дальним боковым направлениям точность компенсации выше; нет необходимости в дополнительных специальных мерах по обеспечению определенных соотношений между мощностями обоих каналов; приведённые результаты показали принципиальную возможность адекватной компенсации фоновых помеховых сигналов в микроволновой радиометрической системе [9].

### Экспериментальные исследования ДН антенных каналов

Кроме численного моделирования ДН двухмодового облучателя было выполнено экспериментальное исследование его направленных свойств. Результаты экспериментальных измерений ДН двухмодового облучателя соответствующих диапазонов по радиотепловому излучению полупроводниковых генераторов шума, используемых в качестве точечного излучателя, находящегося в дальней зоне антенны микроволнового радиометра, представлены на рис. 3.





**Рис. 3.** Результаты экспериментальных исследований ДН многоволнового двухмодового облучателя:  
1 – волна  $H_{11}$  (ОСН – канал), 2 – волна  $E_{01}$  (ДОП – канал)

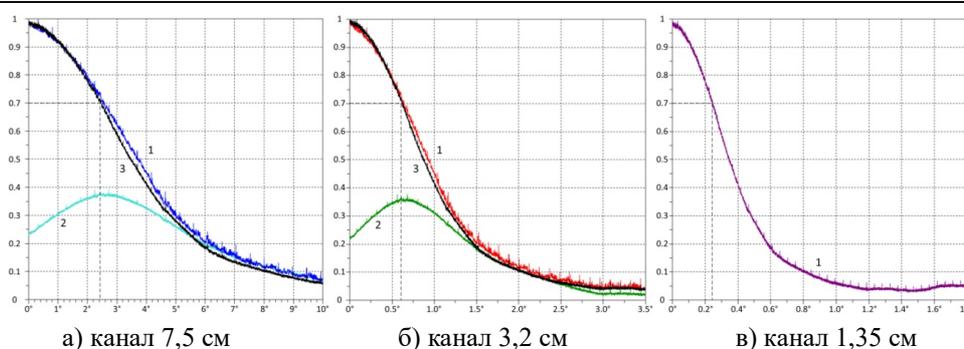
Результаты экспериментальных исследований направленных свойств двухмодового облучателя показали хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных, что подтвердило возможность реализации требуемых характеристик направленности для формирования сигналов компенсации адекватных помеховым составляющим входных сигналов системы в трёх указанных частотных диапазонах [10].

Измерения направленных свойств проводились в дальней зоне антенной системы в условиях открытого полигона. В качестве точечных источников излучения использовались естественные источники радиотеплового излучения. Результаты экспериментальных исследований ДН антенной системы многочастотной микроволновой радиометрической системы по радиотепловому излучению Солнца представлены на рис. 4.

### Заключение

При использовании исследуемой антенны с синфазно-противофазным возбуждением зеркала может быть обеспечена 10%-ная погрешность компенсации помеховых составляющих, обусловленных приёмом излучения антенной через изотропную часть области рассеяния и 15%-ная погрешность компенсации помеховых составляющих, обусловленных приёмом излучения через неизотропную часть области рассеяния антенной температуры радиометрической системы, при относительном уровне потерь информационной составляющей – 0,078. Для сравнения: погрешность численной корректировки данных радиометрических измерений при условии неизменности и однородности фонового излучения составляет около 10%.

Таким образом, применение двухмодовой антенной системы в микроволновой радиометрической системе обеспечит выполнение опе-



**Рис. 4.** Экспериментальные ДН антенной системы ( $D = 2400$  мм) многочастотной микроволновой радиометрической системы, измеренные по излучению Солнца:  
1 – волна  $H_{11}$  (ОСН – канал горизонтальной поляризации), 2 – волна  $E_{01}$  (ДОП – канал),  
3 – волна  $H_{11}$  (ОСН – канал вертикальной поляризации)

рации компенсации влияния фонового излучения в рабочем диапазоне частот.

### Литература

1. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылёв Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
2. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // *Radio Science*. 2003. No. 38 (4): 8079.
3. Rose T., et al. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere // *Atmospheric Reseach*. 2005. Pp. 183–200.
4. Pranab Kumar Karmakar. Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing. Methods and Applications. CRC Press, 2013. 214 p.
5. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2014. № 1(13). С. 50–62.
6. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2015. № 1 (17). С. 5–12.
7. Fedoseeva E.V. An Estimate of the Error of Measurements of Radio Brightness Temperature in Radio-Heat Location Systems for Monitoring Meteorological Parameters with Background Noise Compensation // *Measurement Techniques*. March 2015, Vol. 57, Iss. 12. Pp. 1463–1468.
8. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Исследование антенного устройства трехдиапазонной СВЧ – радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы с компенсацией влияния фонового излучения // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2015. № 3(19). С. 94–100.
9. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Schukin G.G. The study of polarimetric properties microwave radiometric system atmospheric sounding background noise compensation // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.
10. Fedoseeva, E.V., Rostokin I.N., Fedoseev A.A. Research mode dual-band antenna splitter dual-channel microwave radiometric system with compensation of background noise // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.

Поступила 28 ноября 2018 г.

English

## DIRECTIONAL PROPERTIES INVESTIGATION OF DUAL-MODE ANTENNA SYSTEM WITH ENVIRONMENT BACKGROUND RADIATION COMPENSATION

**Elena Anatoljevna Rostokina** – Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Monitoring and Control in Engineering Systems, Murom Institute (branch) «Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs».

*E-mail:* arostokina@yandex.ru.

*Address:* 602264, Murom, Orlovskaya St, 23.

*Abstract:* The paper analyzes the directional properties of multi-frequency two-mode polarimetric antenna system with the environment background radiation compensation based on the classical principles of wanted signal extraction in antenna devices of microwave radiometric systems – antenna smoothing equation, which is characterized by available three measuring channels (1.35 cm, 3.2 cm, 7.5 cm) and is designed to study the radio-thermal radiation of various development stages of convective clouds development in poor weather conditions. The investigation of the basic principles of the antenna system beam-forming of multi-frequency microwave radiometric measuring facility based on the reception in two orthogonal linear polarization with the simultaneous compensation signal generation in the auxiliary antenna channel output when performing the polarization isolation of the main measuring channels and the isolation of the main and auxiliary channels in the particular device - the mode separator operating in dual-mode. The results of directional pattern mathematical simulation of dual-mode radiator for three measuring channels of microwave radiometric system are presented. The experimental measurement results of dual-mode radiator directional patterns by radio-thermal radiation of semiconductor noise generators used as a point radiator located in the far area of the microwave radiometer antenna, corresponding frequency ranges are given. The paper presents practical research results of the stationary antenna system directional properties of the multi-frequency microwave radiometric system, consisting in the measurement of experimental directional patterns of multi-frequency dual-mode antenna system by the main measuring channel in two linear polarizations (vertical and horizontal) and by the auxiliary measuring

channel with the predominant reception of background radiation coming from sidelobes. The experimental research results of the dual-mode radiator directional properties demonstrated good compliance with the estimated and experimental data that confirmed the feasibility of the required directional characteristics for the compensation signals radiation adequate to the noise components of the system input signals in the three specified frequency ranges.

*Keywords:* microwave radiometry, dual-mode antenna systems, directional pattern, background radiation, atmosphere remote sensing.

### References

1. *Stepanenko V.D., Schukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radiometry in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
2. *Ware R.A.* A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Science*. 2003. No. 38 (4): 8079.
3. *Rose T., et.al.* A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere. *Atmospheric research*. 2005. Pp. 183–200.
4. *Pranab Kumar Karmakar.* Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing. Methods and Applications. CRC Press, 2013. 214 p.
5. *Fedoseeva E.V., Schukin G.G., Rostokin I.N., Rostokina E.A.* Noise compensation in microwave radiometric system operation. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2014. № 1 (13). Pp. 50–62.
6. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Issues of engineering multi-frequency microwave radiometric system for cloudy atmosphere remote sensing with background radiation compensation. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2015. No. 1 (17). Pp. 5–12.
7. *Fedoseeva E.V.* An Estimate of the Error of Measurements of Radio Brightness Temperature in Radio-Heat Location Monitoring Systems for Meteorological Parameters with Background Noise Compensation. *Measurement Techniques*. March 2015, Vol. 57, Iss. 12. Pp. 1463–1468.
8. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Antenna array investigation of three-band microwave radiometric system of atmosphere remote sensing with background radiation compensation. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2015. No. 3 (19). Pp. 94–100.
9. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Schukin G.G.* The study of polarimetric properties microwave radiometric system atmospheric sounding background noise compensation // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.
10. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Fedoseev A.A.* Research mode dual-band antenna splitter dual-channel microwave radiometric system with compensation of background noise // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.