

Семенихина Диана Викторовна – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; кафедра антенн и радио-передающих устройств; д.т.н.; профессор.

Сергеев Сергей Николаевич – e-mail: veter@tsure.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ГСП-96; тел.: 88634318000; заместитель директора по развитию производства опытно-производственной базы Южного федерального университета.

Носаков Сергей Николаевич – e-mail: ross@tsure.ru; ведущий конструктор опытно-производственной базы Южного федерального университета.

Semenikhin Andrey Ilarionovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: anilsem@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371733; the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng. sc.; professor.

Semenikhina Diana Viktorovna – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng. sc.; professor.

Sergeev Sergey Nikolaevich – e-mail: veter@tsure.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: 88634318000; deputy director for the development of production of development and production base of the Southern federal university.

Nosakov Sergey Nikolaevich – e-mail: ross@tsure.ru; master constructor of development and production base of the Southern federal university.

УДК 621.396.677

Ю.В. Юханов, Н.И. Бобков, А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУПОРНОГО
ОБЛУЧАТЕЛЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ
ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ**

Разработан сверхширокополосный рупорный облучатель многолучевой зеркальной антенны (ЗА), предназначенный для работы в диапазоне 2–18 ГГц, имеющий характеристики направленности в H-плоскости, приближенные к характеристикам синфазного рупора. Для повышения эффективности возбуждения апертуры ЗА на нижних частотах рабочего диапазона в E-плоскости устанавливается широкоугольная расфазированная насадка на раскрытие двухребневого рупора, а закорачивающие стержни в начале гребней устраняют полуволновый резонанс тока на их вертикальных торцах на высоких частотах.

Приведены результаты расчета рупора после оптимизации его параметров и экспериментальные данные, подтверждающие достоверность электродинамической модели рупора.

Сверхширокополосная зеркальная антенна; рупорный облучатель; двухребневый рупор.

Y.V. Yukhanov, N.I. Bobkov, A.I. Semenikhin, D.V. Semenikhina

**ELECTRODYNAMIC MODELING OF FEED HORN OF MULTIPATH
ULTRA WIDEBAND REFLECTOR ANTENNA**

The ultrawideband feed horn of reflector antenna (RA), working in a range of 2 to 18 GHz and having patterns in the H-plane, close to the pattern of co-phased horn is designed. Wide angle misphased nozzle on the aperture of the double-ridged horn is set to improve the efficiency of excitation of the RA aperture at the lower frequencies in E-plane. Shorting rods at the beginning of ridges eliminate the half-wave resonance of current on their vertical ends at high frequencies.

The results of the calculation of the horn after optimization of its parameters and experimental data supporting the reliability of the horn electrodynamics' model are presented.

Ultrawideband reflector antenna; feed horn; double-ridged horn.

В числе требований, предъявляемых к антенным системам сверхширокополосных (СШП) средств контроля радиоэлектронной обстановки сантиметрового диапазона длин волн, наряду с высокой направленностью по азимуту немаловажным является обеспечение широкоугольного одновременного обзора пространства по углу места. При создании многолучевой зеркальной антенны (ЗА), удовлетворяющей этим противоречивым требованиям, разработка облучателей, обеспечивающих основные характеристики антенны, вызывает затруднения в силу следующих обстоятельств. Во-первых, для стабилизации ширины парциальных диаграмм направленности (ДН) зеркальной антенны в Н-плоскости в полосе рабочих частот ДН облучателя в этой плоскости должна убывать по ширине с ростом частоты [1–5] и быть приближенной к ДН синфазного рупора с тем же размером раскрыва. Во-вторых, по причине размещения в фокальной области отражателя нескольких облучателей, размер их раскрыва в Н-плоскости ограничен. В-третьих, в Е-плоскости облучатель должен создавать близкое к оптимальному амплитудное распределение по апертуре отражателя на низких частотах и существенно более спадающее к краям апертуры на высоких, что обусловлено более жесткими требованиями к уровню бокового излучения ЗА в области верхних частот. В-четвертых, амплитудные и фазовые ДН облучателя должны быть симметричны, поперечное положение фазового центра должно быть стабильным, а продольное перемещение минимальным.

В [6] описан полуоткрытый СШП гребневый рупор, различные варианты которого широко распространены в качестве измерительных антенн. Работа этих рупоров основана на принципе излучения расширяющихся щелевых антенн, или антенн Вивальди, чем и обусловлены их достаточно широкие ДН в Н-плоскости. Так, например, измерительный рупор 3117 фирмы ETS-LINDGREN [7] (см. фото на рис. 1) имеет в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц ширину ДН от 115 до 22 градусов, что более чем в два раза шире, чем у синфазного рупора с тем же раскрывом. При установке металлических боковых стенок с ростом частоты ДН рупора в Н-плоскости вначале становится более узкой в полосе частот от 2 ГГц до 10 ГГц, а затем, при дальнейшем росте частоты до 18 ГГц ДН расширяется и искажается в силу многомодового режима распространения волн.

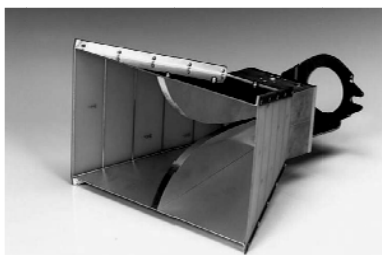


Рис. 1. Фото прототипа СШП облучателя [7]

Цель настоящей работы – создание СШП двухгребневого рупорного облучателя многолучевой ЗА для работы в диапазоне частот 2–18 ГГц с характеристиками направленности в Н-плоскости, приближенными к характеристикам синфазного рупора.

Для формирования диаграмм направленности в Н-плоскости, приближенных к ДН синфазного рупора, боковые стенки рупора, параллельные вектору Е, выполним с изломом [8, 9] (рис. 2). Широкоугольная расфазированная насадка на раскрыве рупора предназначена для повышения эффективности возбуждения апертуры ЗА на низкочастотной границе рабочего диапазона в Е-плоскости.

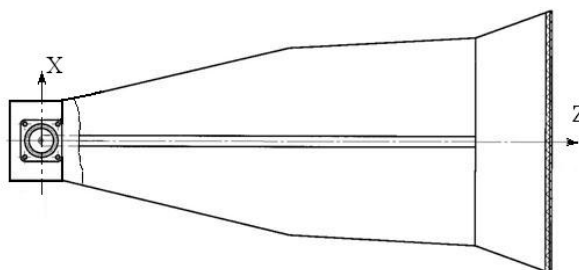


Рис. 2. Конфигурация рупорного облучателя в H-плоскости

Электродинамическое моделирование рупора выполним в пакете программ *Ansoft HFSS*. Модель СШП рупорного облучателя приводится на рис. 3 и включает в себя модели рупора с насадкой, двух его гребней и элементов коаксиального питания волноводной секции рупора с прямоугольным резонатором.

Профиль гребня в плоскости YOZ строится с использованием экспоненциальной линии, задаваемой уравнением:

$$y(z, Ke, Lr) = z \cdot \frac{\exp(Ke \cdot z) - 1}{\exp(Ke \cdot Lr) - 1} \cdot \frac{br - dr}{2 \cdot Lr} + 0.5 \cdot dr, \quad (1)$$

где Ke – параметр профиля, dr – начальный зазор между гребнями при $z=0$; br, Lr – соответственно, высота раскрыва рупора и длина рупора (без учета насадки).

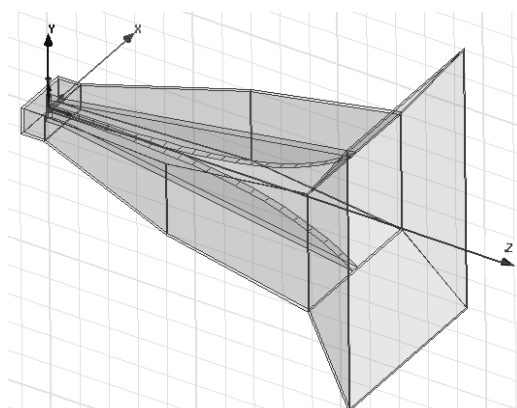


Рис. 3. HFSS-модель СШП рупорного облучателя

Для снижения КСВН облучателя в области верхних частот начальная часть гребней скруглена в плоскости XOZ (рис. 4,а), а на их торцах по середине высоты гребней установлены согласующие стержни, электрически замкнутые с задней стенкой резонатора (рис. 4,б).

Результаты расчета оптимизированной модели рупора показаны на рис. 5–7. Уровень КСВН рупора без стержней не превышает 2,7 в полосе 2–18 ГГц (рис. 5, пунктирная линия). Закорачивающие стержни, предназначенные для изменения структуры поля в резонаторе, устраняют дополнительный полуволновый резонанс тока на вертикальных торцах гребней на высокочастотной границе рабочего диапазона (рис. 5, сплошная линия), ухудшая согласование до КСВН=2,15 на нижних частотах. Расчеты показали, что размещение стержней по середине гребней не является наилучшим в смысле минимума КСВн в диапазоне частот.

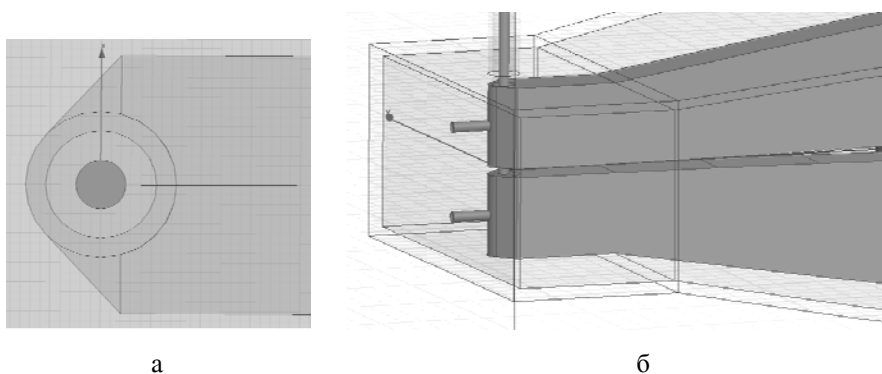


Рис. 4. Построение начальной части гребней без согласующих стержней (а) и со стержнями (б)

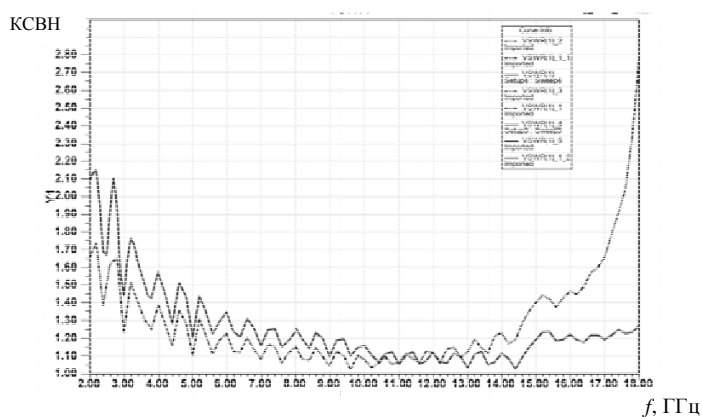


Рис. 5. КСВН рупорного облучателя в диапазоне частот 2–18 ГГц с согласующими стержнями и без стержней

На рис. 6 приведена частотная зависимость КСВН облучателя с согласующими стержнями, расположенными на расстоянии $b/8$ (по оси Y) от стенок резонатора (сплошная линия), т.е. со стержнями, сдвинутыми к стенкам рупора. Для сравнения там же помещена зависимость КСВН облучателя со стержнями посередине гребней (пунктирная линия). Такой модифицированный облучатель имеет $КСВН < 1.9$ во всем диапазоне частот от 2 до 18 ГГц.

Коэффициент усиления рупорного облучателя в диапазоне частот от 2 ГГц до 18 ГГц возрастает от 9,6 дБ до 22 дБ. Ширина ДН по уровню минус 3 дБ в H -плоскости убывает с ростом частоты от 66° до 10° , как показано на рис. 7. Для синфазного рупора с таким же размером раскрытия в H -плоскости расчетные значения ширины ДН лежат в пределах от 65° до $9,5^\circ$.

Для экспериментальной проверки электродинамической модели изготовлен образец рупорного облучателя, внешний вид которого приведён на рис. 8. Раскрыв рупорной насадки имеет размер 130x180 мм, общая длина облучателя не превышает 260 мм.

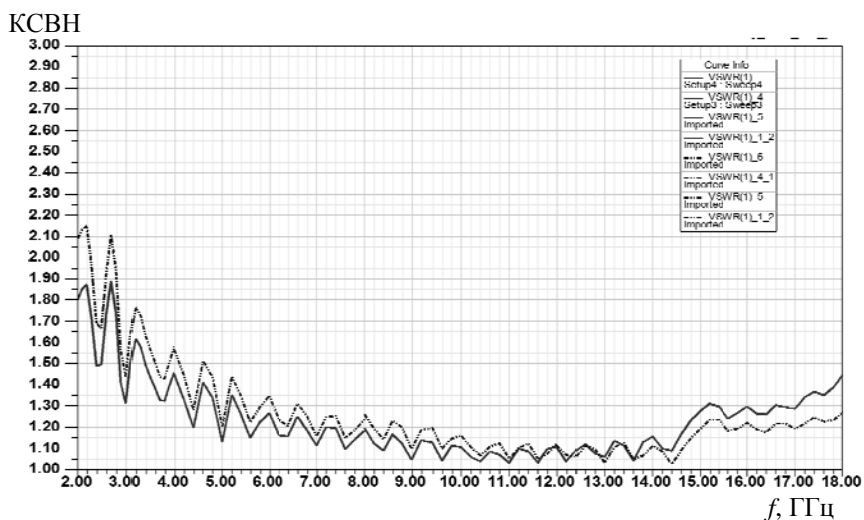


Рис. 6. Частотные характеристики КСВН двух облучателей с различным расположением согласующих стержней: сплошная линия – стержни сдвинуты к стенкам рупора; пунктирная линия – стержни -посередине гребней рупора

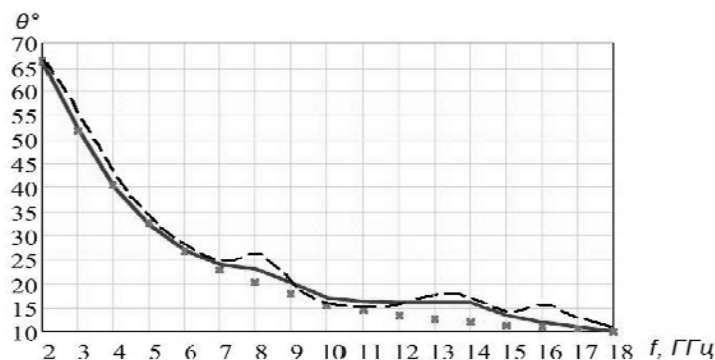


Рис. 7. Сравнение рассчитанной и измеренной частотной зависимости ширины ДН θ в градусах: сплошная линия – расчет; пунктирная линия – эксперимент; крестиками показаны значения ширины ДН для синфазного раскрыва в H -плоскости

Измерения ДН облучателя проводились на частотах 2 ГГц, 4 ГГц, 8 ГГц, 12 ГГц и 18 ГГц в Е- и Н-плоскостях, соответствующие графики приведены на рис. 9. Эксперимент подтвердил результаты моделирования. Измеренная ширина ДН рупора в Н-плоскости с ростом частоты монотонно убывает от 66° до $11,8^\circ$; исключение составляют лишь частоты 8 ГГц, 13 ГГц и 16 ГГц, где наблюдаются небольшие всплески (возрастание) ширины ДН. Для сравнения с расчетом экспериментальные значения ширины ДН по уровню минус 3 дБ также приведены на рис. 7 пунктиром.

Разработанный рупорный облучатель входит в состав сверхширокополосной многолучевой приемной зеркальной антенны, предназначенной для перспективных мобильных средств радиоэлектронного контроля источников радиоизлучения с высокой чувствительностью. Практически полная симметрия рупора в главных плоскостях обеспечила симметрию ДН и стабильное поперечное положение фазо-

вого центра, а конфигурация стенок рупора с изломом в Н-плоскости определила монотонный характер изменения ширины ДН обратно пропорционально частоте с максимальным приближением к ДН синфазного рупора. Относительная расфазировка раскрыва облучателя в Е-плоскости на частоте 18 ГГц составляет около 180° . Благодаря этому его ДН на частотах выше 8 ГГц в Е-плоскости не имеют явно выраженных противофазных боковых лепестков. В этом случае распределение поля в апертуре зеркальной антенны не является синфазным, фаза меняется плавно без скачков и не имеет противофазных участков.



Рис. 8. Фото образца рупорного облучателя

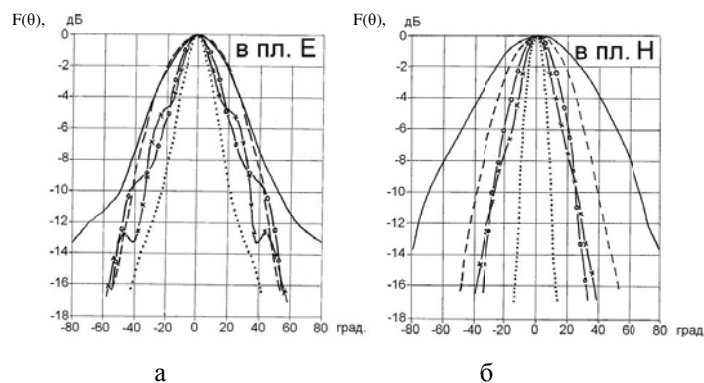


Рис. 9. Измеренные ДН рупорного облучателя в Е-плоскости (а) и Н-плоскости (б): сплошная линия – 2 ГГц; пунктирная линия – 4 ГГц; прерывистая линия с кружками – 8 ГГц; прерывистая линия с крестиками – 12 ГГц; точки – 18 ГГц

Указанные обстоятельства определили эффективность облучателя и способствовали достижению высоких технических характеристик СШП многолучевой ЗА (коэффициент усиления, уровень бокового излучения, стабильность положения электрических осей парциальных ДН в диапазоне рабочих частот), что подтверждено испытаниями ее макета, проведенными на открытом полигоне в дальней зоне. Уровень бокового излучения макета ЗА в азимутальной плоскости не превышает минус 17 дБ и снижается до минус 28 дБ с ростом частоты. Коэффициент усиления первого (ближнего к земле) луча ЗА возрастает с частотой от 26 дБ до 36 дБ. Максимальное отклонение электрических осей парциальных ДН в азимутальной плоскости не превышает $0,15^\circ$ в диапазоне 2–6 ГГц и $0,08^\circ$ в диапазоне 6–18 ГГц.

Работа выполнена в ЦКП ЮФУ «Прикладная электродинамика и антенные измерения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Walton K.L., Sundberg V.C.* Constant-Beamwidth Antenna Development // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Sep. 1968. – Vol. AP-16, № 5. – P. 510-513.
2. Патент 2435262 (RU) Многолучевая зеркальная антенна. Бобков Н.И., Лизуро В.И., Шабашов А.О., Ступин В.Е., Стуров А.Г., Перунов Ю.М., Мисиков А.Ф. - Бюллетень изобретений №33, 27.11.2011, МПК H01Q 15/00.
3. *Бобков Н.И.* Сверхширокополосная многолучевая зеркальная антенна // Труды Международной научной конференции «ИРЭМВ - 2011». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 93-97.
4. *Бобков Н.И., Габриэлян Д.Д., Зелененко А.Т., Семенов В.Н., Стуров А.Г.* Многолучевая зеркальная антенна для систем сверхширокополосной радиолокации // Сб. докладов V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – Москва, 21-25 ноября 2011 г. – С. 173-177.
5. *Калиничев В.И., Калошин В.А., Пангонис Л.И.* Сверхширокополосная зеркальная антенна с рупорным облучателем Н-образного сечения // Сб. докладов III Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М., 2009. – С. 68-71.
6. *Kerr J.L.* Short axial length broadband horns // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Sep. 1973. – Vol. AP-21, № 5. – P. 710-714.
7. ETS-LINDGREN. Model 3117 Double-Ridged Waveguide Horn: User's Manual. Arrow Point Drive, USA. 2003.
8. *Бобков Н.И.* Сверхширокополосный рупорный облучатель // Сб. научных трудов «Современные проблемы радиоэлектроники». Материалы третьей международной конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во РТИСТ ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – С. 248-251.
9. *Бобков Н.И., Семенихин А.И., Семенихина Д.В.* Рупорный облучатель для многолучевой сверхширокополосной зеркальной антенны. Сб. докладов «67-я Всероссийская конференция с международным участием «Научная сессия, посвященная Дню радио» RDC-2012. – М., 2012. – С. 18-22.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Юханов Юрий Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: y_yukhanov@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Семенихин Андрей Илларионович – e-mail: anilsem@mail.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Семенихина Диана Викторовна – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; д.т.н.; профессор.

Бобков Николай Иванович – Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»; e-mail: gradient@aanet.ru; 344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96; тел.: 88632348900; 88634131563; начальник сектора.

Yukhanov Yury Vladimirovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: y_yukhanov@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371733; the department of antennas and radio transmitters; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Semenikhin Andrey Illarionovich – e-mail: anilsem@mail.ru; phone: 88634371733; the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng. sc.; professor.

Semenikhina Diana Viktorovna – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng. sc.; professor.

Bobkov Nikolay Ivanovich – Joint Stock Company “All-Russian Scientific Research Institute “Gradient”; e-mail: gradient@aanet.ru; 96, Sokolov street, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phone: +78632348900; +78634131563; the chief of research laboratory.