

А. В. Кирпанев¹, А. Н. Михайлов¹

¹ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

ДВУХЧАСТОТНЫЕ АНТЕННЫ С ОФСЕТНЫМИ ТРАНСРЕФЛЕКТОРАМИ

Приведены результаты компьютерного моделирования разработанных двухчастотных антенн миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн с общей излучающей апертурой. Работа антенн в Ka- и W-диапазонах основана на известных принципах построения двухрефлекторных антенн с поворотом плоскости поляризации. Твист-рефлектор рассматриваемых антенн совмещен с поверхностью излучения волноводно-щелевой решетки сантиметрового диапазона длин волн (X-диапазона). Трансрефлектор выполнен по офсетной схеме. Для антенны Ka- и X-диапазонов трансрефлектор является частью параболоида вращения, а в случае антенны W- и X-диапазонов трансрефлектор имеет плоскую структуру зонированной антенны Френеля. Компьютерное моделирование выполнялось на основе метода конечных интегралов, который при надлежаще выбранном шаге дискретизации обеспечивает достоверный результат. Рассчитанные характеристики подтверждают работоспособность рассмотренных вариантов антенн.

Ключевые слова: радиолокационная станция, волноводный тракт, облучатель, твист-рефлектор, волноводно-щелевая антенная решетка, коэффициент усиления антенны, диаграмма направленности

Введение

Современные тенденции развития антенной техники связаны с дальнейшим совершенствованием фазированных и активных фазированных антенных решеток (ФАР и АФАР) [1–5]. Вместе с тем в ряде случаев с учетом предъявляемых к радиосистеме требований целесообразно использовать антенны оптического типа или, например, волноводно-щелевые решетки (ВЩАР) с электромеханическим сканированием. В настоящее время ВЩАР X-диапазона широко применяются в качестве антенн бортовых РЛС переднего обзора. Антенны оптического типа (рефлекторные) находят применение в миллиметровом диапазоне длин волн [6, 7]. При этом широкое распространение получили антенны с поворотом плоскости поляризации (АППП) [8–11]. Это обусловлено возможностью сканирования в широком секторе ($\pm 45^\circ$) по двум угловым координатам с помощью поворота твист-рефлектора, который имеет небольшую массу. При применении АППП приемопередатчик, волноводный тракт облучателя и сам облучатель остаются неподвижными, что исключает вращающиеся переходы, которым свойственны большие потери в миллиметровом диапазоне.

Совмещение в одной радиолокационной станции (РЛС) двух существенно разнесенных радиочастотных каналов дает неоспоримые преимущества, связанные со значительным повышением информативности подобных РЛС. С целью уменьшения массы и занимаемого станцией объема желательнее разрабатывать двухчастотные антенны с общей апертурой.

Двухчастотная антенна с общей апертурой может быть построена на принципах АППП [12]. При общем трансрефлекторе параболической формы основные проблемы связаны с созданием двухчастотного твист-рефлектора и облучателя с совмещенными на фокальной оси фазовыми центрами для каждого частотного диапазона. Другим вариантом является комбинированная двухдиапазонная антенная система (ДАС), состоящая из ВЩАР X-диапазона, излучающая поверхность которой является также поверхностью одночастотного твист-рефлектора АППП миллиметрового диапазона [13].

Антенны миллиметрового диапазона имеют высокий коэффициент направленного действия (КНД) при малой ширине главного лепестка диаграммы направленности (ДН) и обеспечивают РЛС хорошее угловое разрешение объектов и картину радиолокационной обстановки в целом. Вместе с тем в сложных метеоусловиях электромагнитные волны (ЭМВ) миллиметрового диапазона имеют высокое затухание при распространении [14]. В табл. 1 приведены погонные затухания для ЭМВ Ka- и W-диапазонов в различных погодных условиях.

Если наибольший линейный размер апертуры ВЩАР превышает 400 мм, то для реализации миллиметрового канала целесообразно остановиться на Ka-диапазоне, так как для АППП при наибольшем размере апертуры диаграммообразующего трансрефлектора 340–370 мм такой диапазон обеспечит хорошее отображение радиолокационной

Таблица 1. Погонные затухания ЭМВ Ka- и W-диапазонов

Метеоусловия	Дождь		
	Сильный дождь, 16 мм/ч	Средний дождь, 4 мм/ч	Слабый дождь, 1 мм/ч
Погонное затухание для Ka-диапазона, дБ/км	3,3	0,8	0,18
Погонное затухание для W-диапазона, дБ/км	8	2,7	0,8
Метеоусловия	Туман		
Оптическая видимость	Сильный туман, 30 м	Средний туман, 130 м	Слабый туман, 600 м
Погонное затухание для Ka-диапазона, дБ/км	1,1	0,17	0,015
Погонное затухание для W-диапазона, дБ/км	9	1,2	0,12

обстановки в сложных метеоусловиях с учетом сравнительно небольших затуханий (табл. 1). Это важно для больших воздушных судов, имеющих высокую посадочную скорость, при которой необходимо отображение в сложных метеоусловиях адекватной радиолокационной обстановки на дальностях, обеспечивающих своевременное принятие решения. Если же наибольший линейный размер апертуры ВЦАР не превышает 300 мм, то миллиметровый канал предпочтительно реализовать в W-диапазоне. Двухканальный локатор со сканирующей двухчастотной антенной X- и W-диапазонов способен существенно повысить функциональность РЛС, например вертолетов поисково-спасательной службы, которым необходимо выполнять полеты на небольшой высоте над пересеченной местностью, в том числе в ночное время суток.

Конструкции, модели и расчетные характеристики офсетных ДАС

Обобщенная схема ДАС Ka- и X-диапазонов, на основании которой была построена расчетная модель, приведена на рис. 1.

Основные принципы работы ДАС приведены в [13], где также рассмотрена офсетная схема построения ДАС в W- и X-диапазонах. Компьютерное моделирование выполнялось при следующих основных размерах: диаметр трансрефлектора – 120 мм, диаметр твист-рефлектора – 134 мм, фокусное расстояние – 84 мм.

Поляризационная структура твист-рефлектора представляла собой решетку проводников на поверхности диэлектрической пластины. В качестве облучателя трансрефлектора использовался пирамидальный рупор. Излучающая апертура ВЦАР образована широкими стенками прямоугольных волноводов, в которых прорезаны щели размером 15×3 мм (рис. 1). Стенки щелевых отверстий в диэлектрической пластине твист-рефлектора были металлизированы.

Компьютерный расчет выполнялся с помощью точного метода конечных интегралов с наибольшим линейным размером границы ячейки сетки $\lambda/16$. Размеры ДАС были выбраны для моделирования при ограниченных вычислительных ресурсах. Этим же обусловлено размещение в модели

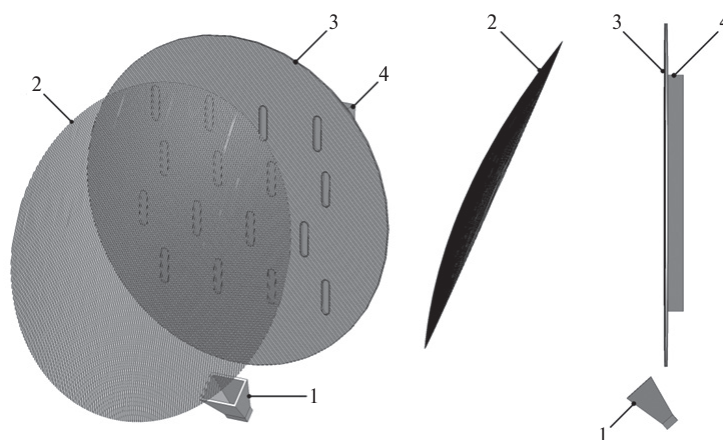


Рисунок 1. Двухдиапазонная антенная система с параболическим офсетным трансрефлектором: 1 – облучатель; 2 – трансрефлектор; 3 – твист-рефлектор; 4 – ВЦАР

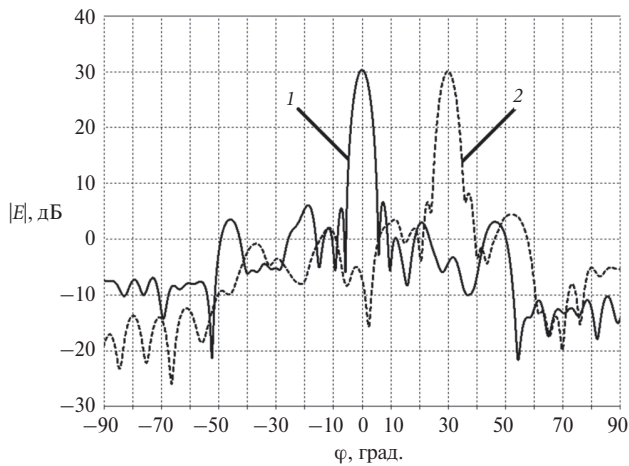


Рисунок 2. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в Ка-диапазоне в Е-плоскости для углов отклонения твист-рефлектора по азимуту φ : $1^\circ-0^\circ$; $2^\circ-15^\circ$

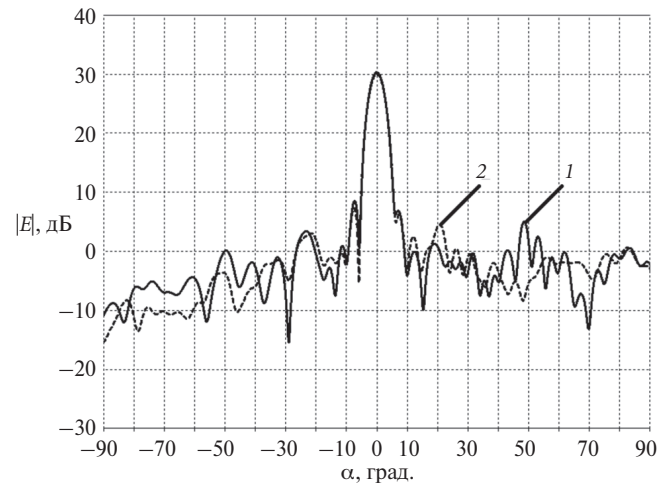


Рисунок 3. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в Ка-диапазоне в Н-плоскости для углов отклонения твист-рефлектора по азимуту φ : $1^\circ-0^\circ$; $2^\circ-15^\circ$

трансрефлектора диэлектрического колпака в «воздухе» (рис. 1), а не на параболическом сегменте поверхности, как это обычно имеет место на практике. Рассчитанные ДН ДАС в Ка-диапазоне приведены на рис. 2, 3, а на рис. 4 показана ДН ДАС в Х-диапазоне. На рис. 2–4 использованы следующие обозначения: $|E|$ – амплитудное значение основной поляризационной составляющей напряженности электрического поля, φ – азимутальный угол, α – угол возвышения.

Высокий уровень боковых лепестков связан с амплитудными значениями поля возбуждения на щелевых отверстиях ВЩАР небольшого размера (4×4 щелевых излучателя). Небольшая асимметрия ДН в Н-плоскости обусловлена влиянием офсетного трансрефлектора. Основные характеристики излучения, полученные в результате моделирования, сведены в табл. 2.

В табл. 2 введены следующие обозначения: КНД – коэффициент направленного действия; ШДН – ширина главного лепестка ДН; УБЛ – уровень первого бокового лепестка. Как видно из результатов компьютерного моделирования в Х-диапазоне частот, ДАС имеет приемлемые для компактной антенны характеристики излучения. В Ка-диапазоне частот ДАС показана возможность сканирования в достаточно широком угловом диапазоне без значительного снижения характеристик излучения (рис. 2).

ДАС, построенная подобным образом, но для W- и X-диапазонов длин волн, приведена в [13]. Однако изготовление трансрефлектора W-диапазона, являющегося сегментом параболоида вращения, представляет собой сложную задачу по следующим основным причинам:

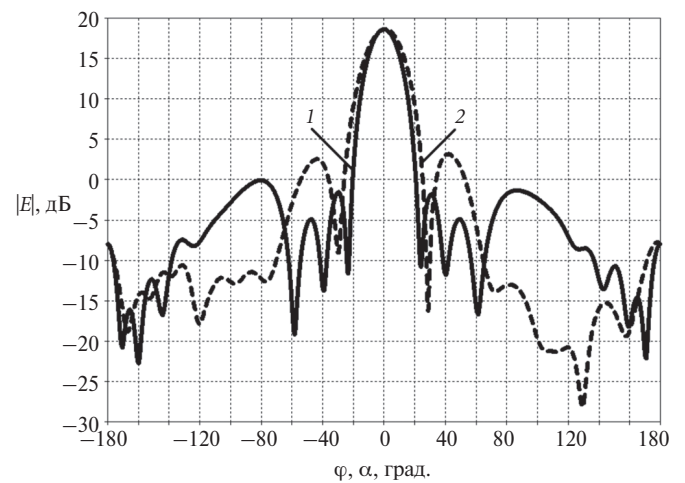


Рисунок 4. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в Х-диапазоне в Е-плоскости (1) и Н-плоскости (2)

- сложность обеспечения точности изготовления поверхности второго порядка для W-диапазона;
- трудность получения проводящего слоя требуемой однородности по толщине при металлизации;
- проблемы с созданием поляризационной структуры требуемой геометрии.

Эти причины не позволяют, как правило, обеспечить хорошую повторяемость геометрии трансрефлекторов и, как следствие, основных характеристик антенн в W-диапазоне. Если диаметр трансрефлектора превышает 180 мм, эти проблемы становятся технологически труднопреодолимыми.

Таблица 2. Основные характеристики излучения

Частотный диапазон	X		Ka			
	E	H	E	H	E	H
Плоскость сечения	E	H	E	H	E	H
Угол отклонения твист-рефлектора, град.	0	0	0	0	15	0
Угол отклонения луча ДН, град.	0	0	0	0	29,9	0
КНД, дБ	18,6		30,3		30,0	
ШДН (3 дБ), град.	19,4	23,8	4,5	4,6	4,6	4,7
УБЛ, минус дБ	18,7	15,5	24,3	23,4	21,8	22,7

В качестве альтернативы параболическим рефлекторам антенн оптического типа хорошо известны и находят в настоящее время широкое применение плоские зонированные рефлекторы Френеля [15–17]. Такие рефлекторы производятся по хорошо отработанной технологии изготовления печатных плат [18]. У антенн с подобными рефлекторами, естественно, ниже коэффициент использования поверхности (КИП) и, как следствие, меньше КНД и коэффициент усиления (КУ). На основе таких рефлекторов разработаны трансрефлекторы, в которых сплошные металлические зоны заменены поляризационными решетками проводников [19, 20].

На рис. 5 показан плоский офсетный многослойный трансрефлектор, общие принципы построения которого приведены в [20].

На практике плоский трансрефлектор образован диэлектрическими слоями. На поверхностях слоев, обращенных к облучателю, размещены проводящие зоны, имеющие структуру поляризационных решеток. При моделировании без потери общности

электродинамической модели использовались «воздушные» (свободная среда) слои, так как при этом фазовая однородность слоев трансрефлектора сохраняется, а вычислительный объем модели уменьшается. Основные геометрические параметры модели следующие: диаметр трансрефлектора – 120 мм; диаметр твист-рефлектора – 134 мм; фокусное расстояние – 65 мм.

Поляризационная структура твист-рефлектора также представляла собой решетку проводников на поверхности диэлектрической пластины толщиной

$$\Delta l = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon}},$$

где λ – длина волны в свободной среде, ϵ – диэлектрическая проницаемость материала пластины. Период решетки твист-рефлектора составлял 0,82 мм, а ширина проводника – 0,25 мм. Стенки щелевых отверстий в диэлектрическом слое твист-рефлектора были металлизированы. Методика расчета геометрии многослойного офсетного трансрефлектора приведена в [20]. Основой этой методики является метод построения многослойной зонированной антенны Френеля, приведенный в [15].

Результаты моделирования представлены на рис. 6–9, а основные расчетные характеристики сведены в табл. 3. На рис. 6–7 приведены ДН ДАС в W-диапазоне, а на рис. 8–9 – в X-диапазоне.

Расчет выполнялся для нулевого положения твист-рефлектора и ВЩАР соответственно.

Выводы

Полученные результаты моделирования демонстрируют возможность создания антенн с существенным разнесением частот и с общей апертурой излучения на основе построения ДАС, объединяющей в себе АППП и ВЩАР. Более технологичный вариант практического создания подобных ДАС основан на применении в качестве трансрефлектора плоских отражателей, построенных на основе зонированных рефлекторов Френеля. Как следует из полученных расчетов (табл. 3), в W-диапазоне ШДН в E- и H-плоскостях отличается на 18'. Увеличение

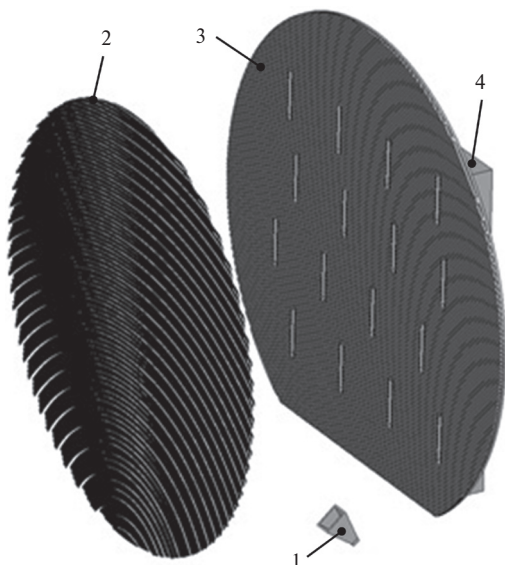


Рисунок 5. Двухдиапазонная антенная система с плоским офсетным трансрефлектором: 1 – облучатель; 2 – трансрефлектор; 3 – твист-рефлектор; 4 – ВЩАР

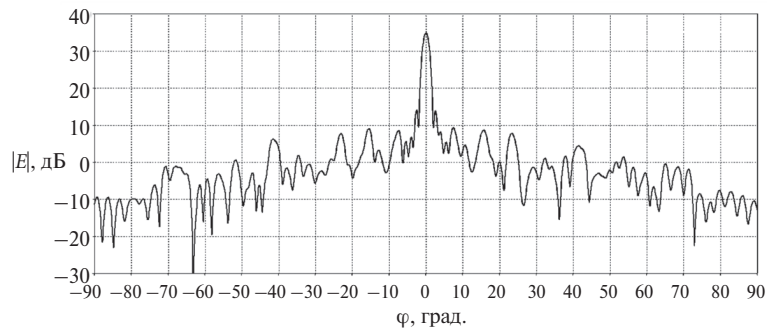


Рисунок 6. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в W-диапазоне в E-плоскости

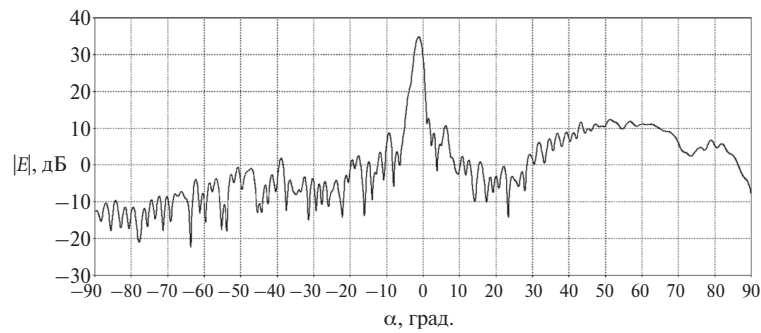


Рисунок 7. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в W-диапазоне в H-плоскости

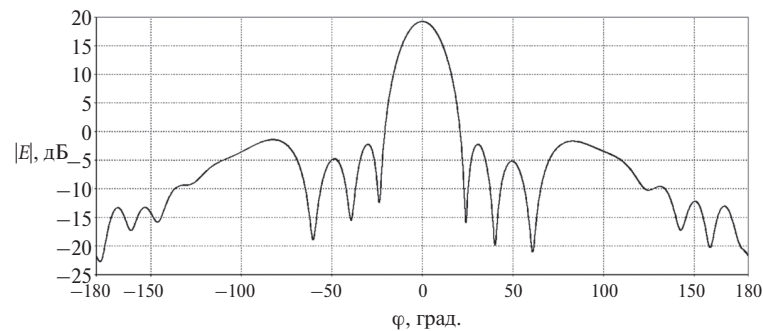


Рисунок 8. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в X-диапазоне в E-плоскости

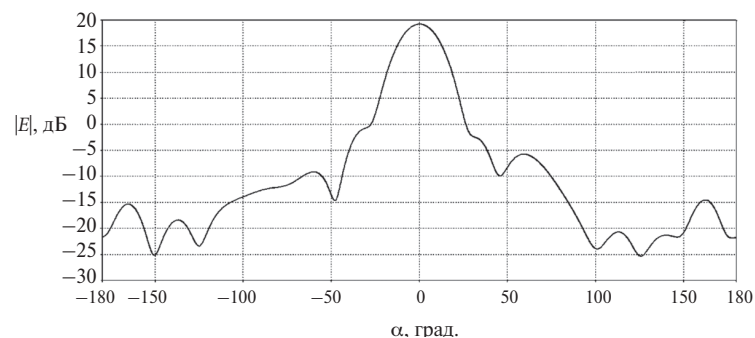


Рисунок 9. Сечение диаграммы направленности двухдиапазонной антенной системы в X-диапазоне в H-плоскости

Таблица 3. Основные характеристики излучения

Частотный диапазон	X		W	
	E-	H-	E-	H-
Плоскость сечения	E-	H-	E-	H-
Угол отклонения твист-рефлектора, град.	0	0	0	0
Угол отклонения луча ДН, град.	0	0	0	-1,2
КНД, дБ	19,2		34,8	
ШДН (3 дБ), град.	19,3	21,6	1,6	1,9
УБЛ, минус дБ	20,7	25	20,8	22,1

ШДН в H-плоскости обусловлено существенной асимметрией амплитудного распределения при использовании в качестве облучателя обычного пирамидального рупора. Это расхождение ШДН может быть преодолено как введением небольшой эллиптичности по контуру трансрефлектора, так и подбором размеров раскрыва облучателя.

Отклонение ДН в W-диапазоне от нулевого значения в H-плоскости связано с небольшой асимметрией фазового распределения, которая может быть вызвана уходом фазового центра облучателя из фокуса и небольшим искажением фазового распределения самим трансрефлектором при

больших углах падения фронта ЭМВ облучателя. Это отклонение может быть устранено, например, с помощью поворота облучателя при неподвижном фазовом центре относительно фокуса трансрефлектора.

Таким образом, можно сделать заключение о целесообразности применения плоских поляризационных отражателей в качестве трансрефлекторов. Дальнейшие пути улучшения характеристик и повышения технологичности подобных ДАС могут быть связаны с применением плоских поляризационных рефлекторов на основе микрополосковых отражательных решеток [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инденбом М. В. Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции. М.: Радиотехника, 2015. 416 с.
2. Филиппов В. С., Пономарев Л. И., Гринев А. Ю. и др. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1994. 592 с.
3. Mailloux R. J. Phased array antenna handbook. 2nd ed. Artech House antennas and propagation Library, 2005. 497 p.
4. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
5. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию). М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
6. Андреев Г. А., Потапов А. А. Миллиметровые волны в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 11. С. 28–62.
7. Minin I. Microwave and millimeter wave technologies: modern UWB antennas and equipment. In-Tech, 2010. 488 p.
8. Niazi A. Y., Moore T. S. Millimeter wave twist reflector scanning antenna // IEE Proc. ICAP. 1983. P. 47–50.
9. Hanfling J. D., Jernic G. Twist reflector design using E-type and H-type modes // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1981. No. 4. Vol. AP-29. P. 622–629.
10. Borkar V. G., Pandharipande V. M. Millimeter wave twist reflector design aspects // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1992. No. 11. Vol. 40. P. 1423–1426.
11. Holzman E. L. Transreflector antenna design for millimeter-wave wireless links // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2005. No. 5. Vol. 47. P. 9–22.
12. Галкина Э. В., Кирпанев А. В., Михайлов А. Н. Сканирующие двухдиапазонные антенны с поляризационными рефлекторами // Сборник научных трудов Всероссийской НТК «Антенны и распространение радиоволн». 2018. С. 143–147.
13. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
14. Кирпанев А. В., Михайлов А. Н. Двухдиапазонная антенная система для бортовой радиолокационной станции переднего обзора // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 9. С. 22–26.
15. Guo Y. J., Barton S. K., Wright T. M. Design of high efficiency Fresnel zone plate antennas // IEEE AP-S Antennas Propagat. Symp. Dig. London, ON, Canada, 1991. P. 182–185.
16. Garrett J. E., Wiltse J. C. Fresnel zone plate antennas at millimeter wavelengths // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1991. Vol. 12. No. 3. P. 195–220.
17. Nguyen B. D., Migliaccio C., Pichot Ch., Yamamoto K., Yonemoto N. W-band Fresnel zone plate reflector for helicopter collision avoidance radar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2007. No. 5. Vol. 55. P. 1452–1456.
18. Балашов В. М., Семенова Е. Г., Трефилов Н. А. Технология производства антенн и устройств СВЧ. М.: МПИ «Мир книги», 1992. 180 с.

19. Кузьмин А. А., Михайлов А. Н. Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского трансрефлектора // Матер. 27-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2017. С. 1187–1193.
20. Батутина М. С., Кузьмин А. А., Михайлов А. Н. Антенна с поворотом плоскости поляризации на основе плоского несимметричного трансрефлектора // Вопросы радиозлектроники. 2019. № 2. С. 26–30.
21. Обуховец В. А., Касьянов А. О. Микрополосковые отражательные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. М.: Радиотехника, 2006. 240 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирпанев Алексей Владимирович, д. т. н., доцент, начальник отдела, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (812) 777-50-51, e-mail: kirpanev_av@radar-mms.com.

Михайлов Артемий Николаевич, начальник лаборатории, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (981) 793-36-53, e-mail: mihajlov_an@radar-mms.com.

For citation: Kirpanev A. V., Mikhailov A. N. Dual-frequency offset transreflector antennas. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 8, pp. 71–78. DOI 10.21778/2218-5453-2019-8-71-78

A. V. Kirpanev, A. N. Mikhailov

DUAL-FREQUENCY OFFSET TRANSREFLECTOR ANTENNAS

The paper presents the results of computer simulation of the developed dual-frequency antennas with a common radiating aperture, operating in the millimeter and centimeter wavelength range. The operation of antennas in the Ka- and W-bands is based on the well-known dual reflector polarization rotating antennas constructing principles. The twistreflector of the considered antennas is combined with the radiation surface of the centimeter wavelength range (X-band) waveguide-slot array. Transreflector is made by offset scheme. For the Ka- and X-bands antenna, the transreflector is a paraboloid of rotation part. In the case of the W- and X-band antenna, the transreflector has a flat Fresnel zoned antenna structure. Computer simulation is based on the method of finite integrals, which provides a reliable result at an appropriately chosen sampling step. The calculated characteristics confirm the operability of the considered antenna options.

Keywords: radar station, waveguide transmission line, feed, twistreflector, waveguide-slot array, antenna gain, radiation pattern

REFERENCES

1. Indenbom M. V. *Antennnye reshetki podvizhnykh obzornykh RLS. Teoriya, raschet, konstruksii* [Antenna arrays of mobile surveillance radars. Theory, calculation, constructions]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015, 416 p. (In Russian).
2. Filippov V. S., Ponomarev L. I., Grinev A. Yu., et al. *Antenny i ustroystva SVCh. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* [Antennas and microwave devices. Designing phased antenna arrays]. Voskresenskii D. I., editor. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1994, 592 p. (In Russian).
3. Mailloux R. J. *Phased array antenna handbook*. 2nd ed. Artech House antennas and propagation Library, 2005, 497 p.
4. Voskresenskii D. I., Kanashchenkov A. I., editors. *Aktivnye fazirovannye antenyne reshetki* [Active phased arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 488 p. (In Russian).
5. Vendik O. G., Parnes M. D. *Antenny s elektricheskim skanirovaniem (vvedenie v teoriyu)* [Antennas with electrical scanning (introduction to theory)]. Moscow, SAINS-PRESS Publ., 2002, 232 p. (In Russian).
6. Andreev G. A., Potapov A. A. Millimeter waves in radar. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1984, no. 11, pp. 28–62. (In Russian).
7. Minin I. *Microwave and millimeter wave technologies: modern UWB antennas and equipment*. In-Tech, 2010, 488 p.
8. Niazi A. Y., Moore T. S. Millimeter wave twist reflector scanning antenna. *IEE Proc. ICAP*, 1983, pp. 47–50.
9. Hanfling J. D., Jernic G. Twist reflector design using E-type and H-type modes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, no. 4, vol. AP-29, pp. 622–629.
10. Borkar V. G., Pandharipande V. M. Millimeter wave twist reflector design aspects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, no. 11, vol. 40, pp. 1423–1426.
11. Holzman E. L. Transreflector antenna design for millimeter-wave wireless links. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, no. 5, vol. 47, pp. 9–22.
12. Galkina E. V., Kirpanev A. V., Mikhailov A. N. Scanning dual band antennas with polarized reflectors. (Conference proceedings) *Antenny i rasprostranenie radiovoln*, 2018, pp. 143–147. (In Russian).
13. Shirman Ya. D., editor. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical foundations of radar]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 560 p. (In Russian).
14. Kirpanev A. V., Mikhailov A. N. The dual-band antenna for an onboard front-looking radar. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 9, pp. 22–26. (In Russian).
15. Guo Y. J., Barton S. K., Wright T. M. Design of high efficiency Fresnel zone plate antennas. *IEEE AP-S Antennas Propagat. Symp. Dig.* London, ON, Canada, 1991, pp. 182–185.
16. Garrett J. E., Wiltse J. C. Fresnel zone plate antennas at millimeter wavelengths. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1991, vol. 12, no. 3, pp. 195–220.

17. Nguyen B. D., Migliaccio C., Pichot Ch., Yamamoto K., Yonemoto N. W-band Fresnel zone plate reflector for helicopter collision avoidance radar. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, no. 5, vol. 55, pp. 1452–1456.
18. Balashov V. M., Semenova E. G., Trefilov N. A. *Tekhnologiya proizvodstva antenn i ustroystv SVCh* [Production technology of antennas and microwave devices]. Moscow, Mir knigi Publ., 1992, 180 p. (In Russian).
19. Kuzmin A. A., Mikhailov A. N. Antenna with rotation of the plane of polarization based on a flat transreflector. (Conference proceedings) *SVCh tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii*, Sevastopol, 2017, pp. 1187–1193. (In Russian).
20. Batutina M. S., Kuzmin A. A., Mikhailov A. N. Transreflector antenna design based on flat multilayer transreflector. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 2, pp. 26–30. (In Russian).
21. Obukhovets V. A., Kasyanov A. O. *Mikropoloskovye otrazhatelnye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie* [Microstrip reflective grating. Design methods and numerical modeling]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 240 p. (In Russian).

AUTHORS

Kirpaneв Alexey, D. Sc., associate professor, chief of department, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (812) 777-50-51, e-mail: kirpaneв_av@radar-mms.com.

Mikhailov Artemiy, chief of laboratory, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (981) 793-36-53, e-mail: mihajlov_an@radar-mms.com.