

Низкопрофильный широкополосный излучатель с круговой поляризацией для построения антенной решетки подвижной станции спутниковой связи

С.К. Величко, Н.Н. Горбатенко

Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи, Ростов-на-Дону

Аннотация: Представлена конструкция низкопрофильного излучателя с круговой поляризацией, обладающего шириной рабочей полосы 75% по уровню КСВ 2, шириной полосы коэффициента эллиптичности по уровню 3дБ 54%. Проведены численные исследования разработанного излучателя с круговой поляризацией в составе антенной решетки.

Ключевые слова: круговая поляризация, широкополосный излучатель, антенная решетка, коэффициент эллиптичности.

Различные услуги, предоставляемые системами спутниковой навигации, получили широкое распространение в областях гражданского и военного назначения. В настоящее время существует четыре глобальных навигационных спутниковых системы (ГНСС): глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС), всемирно-глобальная система позиционирования (GPS), Galileo и BeiDou.

Для систем спутниковой навигации применяются антенны с круговой поляризацией. Хорошо известно, что излучение с круговой поляризацией снижает эффекты многолучевости и обеспечивает возможность изменять взаимную ориентацию приемной и передающей антенны без потери мощности сигнала [1,2].

В навигационных спутниковых системах чаще всего применяются три типа антенн с круговой поляризацией: спиральная антенна, патч-антенна, а также скрещенная дипольная антенна. Спиральные антенны являются сложными в реализации с технологической точки зрения [3,4]. Патч-антенны при простоте излучателя имеют цепи питания, которые включают

квадратурные направленные ответвители [5]. Скрещенные дипольные антенны - наиболее распространенный тип антенн, так как позволяет реализовывать излучение двух линейных поляризаций, либо круговой поляризации, и обеспечивать работу в нескольких диапазонах частот или в широкой полосе частот, при этом излучатель имеет простую конструкцию [6-8].

Скрещенные диполи с круговой поляризацией можно разделить на два типа: с одиночным и двойным питанием. Для антенн с двойным питанием круговая поляризация реализуется возбуждением двух ортогональных резонансных мод, которые обладают одинаковой амплитудой и разностью фаз 90° [9, 10]. У данного типа антенн цепь питания может включать дополнительные устройства по сдвигу фазы сигналов, подаваемых на вибраторные излучатели, что в свою очередь конструктивно усложняет антенну. Конструкция однофидерных антенн проще, так как не требуется дополнительная питающая цепь для обеспечения разности фаз 90° между ортогональными модами. Такие антенны имеют широкий главный луч ДН, но узкую полосу частот [11, 12].

Было рассмотрено несколько видов однофидерных скрещенных дипольных антенн с широкой полосой рабочих частот и широкой полосой коэффициента эллиптичности. У данного типа антенн ортогональные диполи расположены на разных сторонах двусторонней печатной платы, с помощью печатных колец формируется разность фаз между диполями 90° . Фидер выполнен в виде коаксиальной линии сопротивлением 50 Ом [13-16]. В таблице 1 приведены характеристики четырех видов данного типа излучателя.

Таблица 1. Однофидерные излучатели с круговой поляризацией

Вид излучателя	Высота профиля	Полоса частот по уровню КСВ 2	Полоса коэффициента эллиптичности, по уровню 3 дБ	Габаритные размеры излучателя
Скращенные диполи с паразитными патчами [13]	$0,13\lambda_n$	77,6%	66%	$0,48\lambda_n \times 0,48\lambda_n$
Диполь-бабочка [14]	$0,22\lambda_n$	52%	38%	$0,32\lambda_n \times 0,32\lambda_n$
Диполь-бабочка [15]	$0,19 \lambda_n$	22%	11%	$D = 0,27 \lambda_n$
Диполь в форме косы [16]	$0,19 \lambda_n$	22%	5%	$D = 0,25 \lambda_n$

λ_n - длина волны на нижней частоте

Представленные в таблице антенны имеют сложную структуру излучателя [13] либо большие габаритные размеры, в частности высоту профиля, для размещения на транспортном средстве [14], а приведенные в [15] и [16] обладают узкой полосой рабочих частот и коэффициента эллиптичности. В связи с этим требуется разработать излучатель круговой поляризации простой конструкции с малыми габаритными размерами и широким диапазоном рабочих частот.

Цель работы.

Уменьшение высоты профиля широкополосного излучателя с круговой поляризацией.

Решаемые задачи.

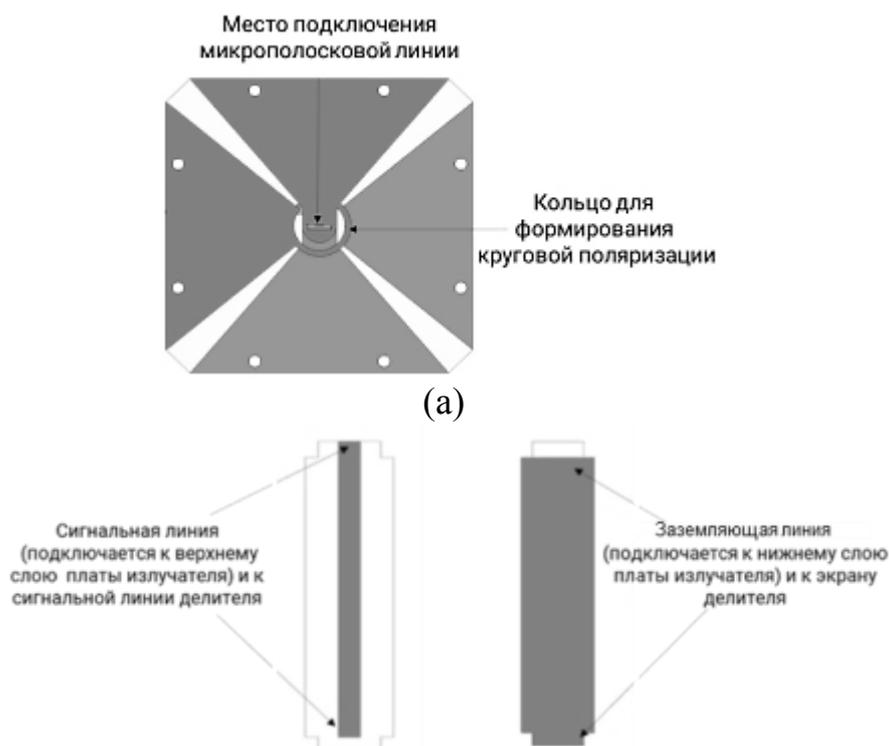
1. Разработка низкопрофильного широкополосного излучателя и АР с круговой поляризацией на основе электродинамических моделей.

2. Экспериментальное исследование макета разработанной антенной решетки.

Конструкции излучателя с круговой поляризацией

Предложенная конструкция излучателя является комбинацией дипольной и щелевой антенн. На нижних частотах антенна работает как дипольная, на верхних как щелевая.

В качестве одиночного элемента АР выбрана конструкция, состоящая из двух печатных плат (рисунок 1, а, б). Излучатель (рис.1) представляет собой два скрещенных вибратора, расположенных на двух сторонах печатной платы Rogers 4003С размером $0,3\lambda_n \times 0,3\lambda_n \times 0,003\lambda_n$ (λ_n - длина волны на нижней частоте). Плечи вибраторов имеют треугольную форму. Первые плечи двух вибраторов соединены печатным кольцом длиной $\lambda/4$, где λ – длина волны середины рабочего диапазона частот, и расположены на верхней стороне платы. Вторые плечи двух вибраторов, расположенные на нижней стороне платы, также соединены печатным кольцом длиной $\lambda/4$.



(б)

Рис.1. Модель излучателя с круговой поляризацией а) плата излучателя
б) плата с микрополосковой линией питания

С помощью печатных колец, которые задают вибраторам необходимую разницу в длине плеч, обеспечивается разность фаз 90° . Таким образом, излучатель имеет два резонанса, сдвинутые по фазе на 90° около требуемой частоты. В свободное пространство излучается два типа волн: прямая и отраженная от металлического экрана (рисунок 2). Прямая волна излучается с круговой поляризацией благодаря использованию печатных колец. Отраженная волна имеет круговую поляризацию благодаря подбору щелей между соседними плечами вибраторов, что создает дополнительный резонанс и дополнительное излучение с круговой поляризацией.

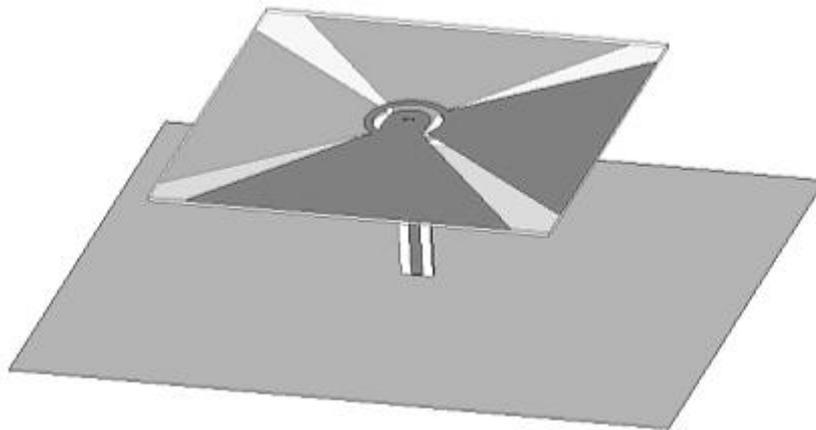
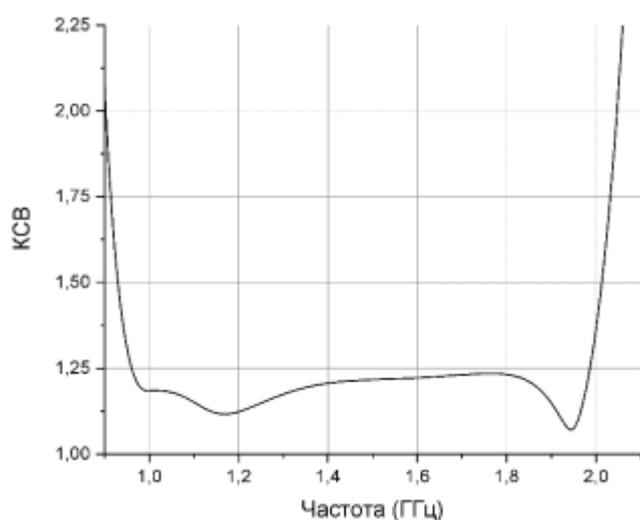


Рис. 2. 3D-модель излучателя с экраном

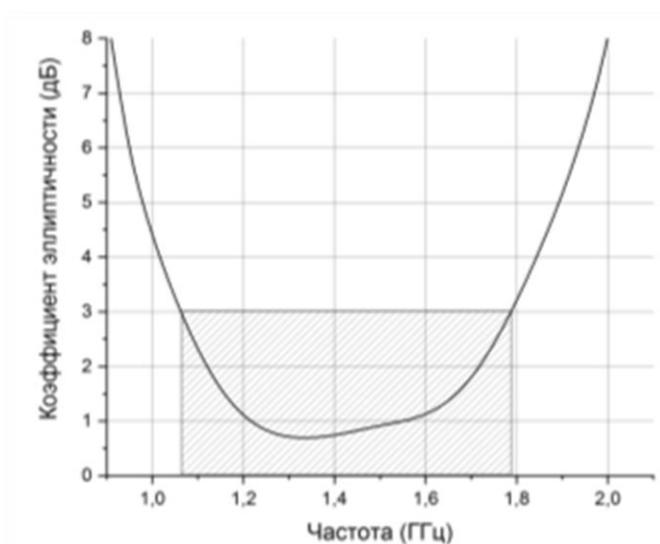
Основным отличием излучателя, рассматриваемого в статье, от представленного в [12], является использование питания с помощью платы с микрополосковой линией вместо коаксиального кабеля. Печатная плата имеет размеры $0,03\lambda_n \times 0,1\lambda_n \times 0,003\lambda_n$ (см. рис.1, б). Питание к плечам вибратора подводится через щель в плате излучателя: сигнальная линия подключается к верхнему слою излучателя, земляная линия подключается к нижнему слою.

Электродинамическое моделирование одиночного излучателя с круговой поляризацией

На рисунке 3 приведены зависимости от частоты коэффициента стоячей волны (КСВ) и коэффициента эллиптичности одиночного излучателя. Рабочая полоса по уровню КСВ 2 составляет 0,9 ГГц-2,05 ГГц. Коэффициент эллиптичности имеет уровень ниже 3 дБ в полосе от 1,04 ГГц до 1,79 ГГц.



а)



б)

Рис. 3. Расчетные характеристики излучателя с круговой поляризацией: а) частотная зависимость КСВ; б) частотная зависимость коэффициента эллиптичности

Рассчитана частотная зависимость коэффициента усиления (КУ) разработанного излучателя (рисунок 4). В полосе от 0,9 ГГц до 2,1 ГГц КУ возрастает без особенностей.

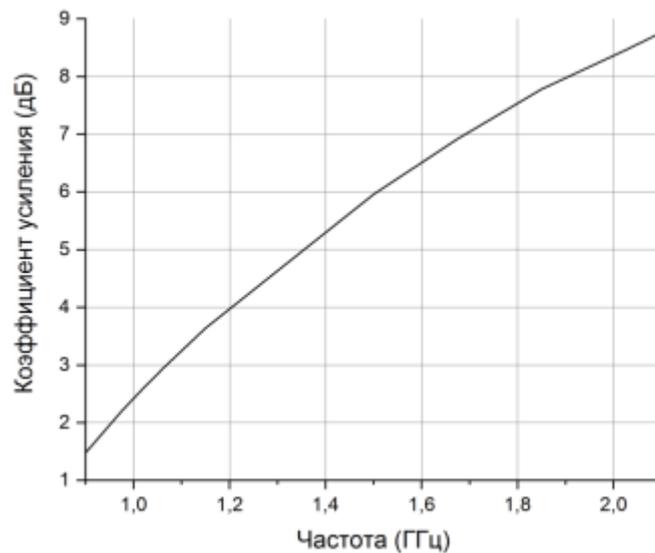


Рис. 4. Частотная зависимость КУ одиночного излучателя с круговой поляризацией

Диаграммы направленности излучателя на нижней и верхней частотах приведены на рисунке 5 (а, б). Ширина диаграммы направленности (ШДН) на нижней частоте составляет 108° в азимутальной плоскости и 96° в угломестной плоскости при коэффициенте усиления 2,4 дБ. На верхней частоте ШДН составляет 76° в азимутальной плоскости и 64° в угломестной плоскости, коэффициент усиления не превышает 7,4дБ.

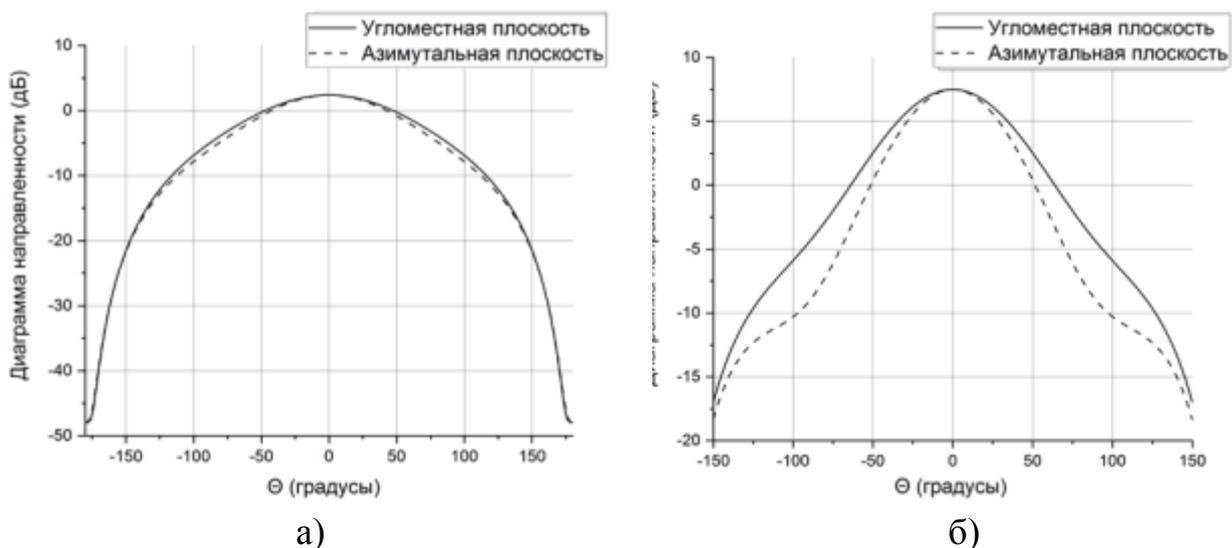


Рис. 5. ДН одиночного излучателя: а) частота 1ГГц; б) частота 1,8ГГц

Конструкция АР с круговой поляризацией

Для исследования характеристик разработанного излучателя с круговой поляризацией в составе АР была построена модель антенной решетки размером 8×2 элементов. С помощью микрополосковой линии излучающие элементы (см. рис. 1) подключаются к двум делителям (рисунок 6). Шаг между элементами составляет $0,4\lambda_n$ по обеим координатам. Делители выполнены в микрополосковом исполнении на печатных платах Rogers размером $0,4\lambda_n \times 1,58\lambda_n \times 0,003\lambda_n$.

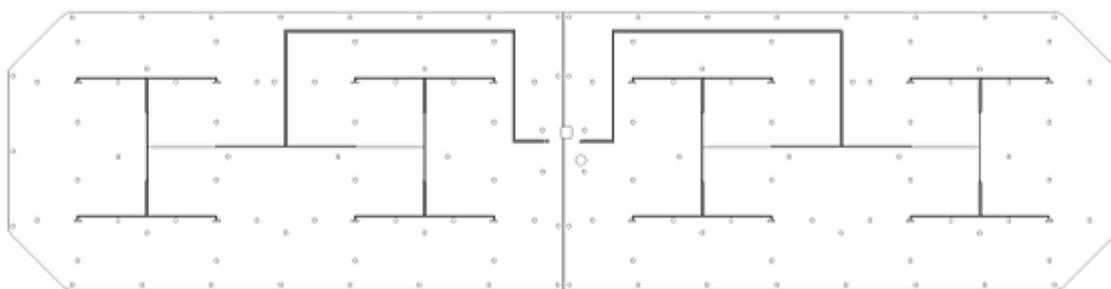


Рис. 6. Микрополосковые делители мощности

Гибридное кольцо (см. рис. 7), также выполненное в микрополосковом исполнении на печатной плате Rogers, служит для формирования суммарной и разностной ДН антенной решетки, а также для соединения двух плат делителей. Соединение гибридного кольца с делителем осуществляется с помощью высокочастотных 50-омных разъемов.

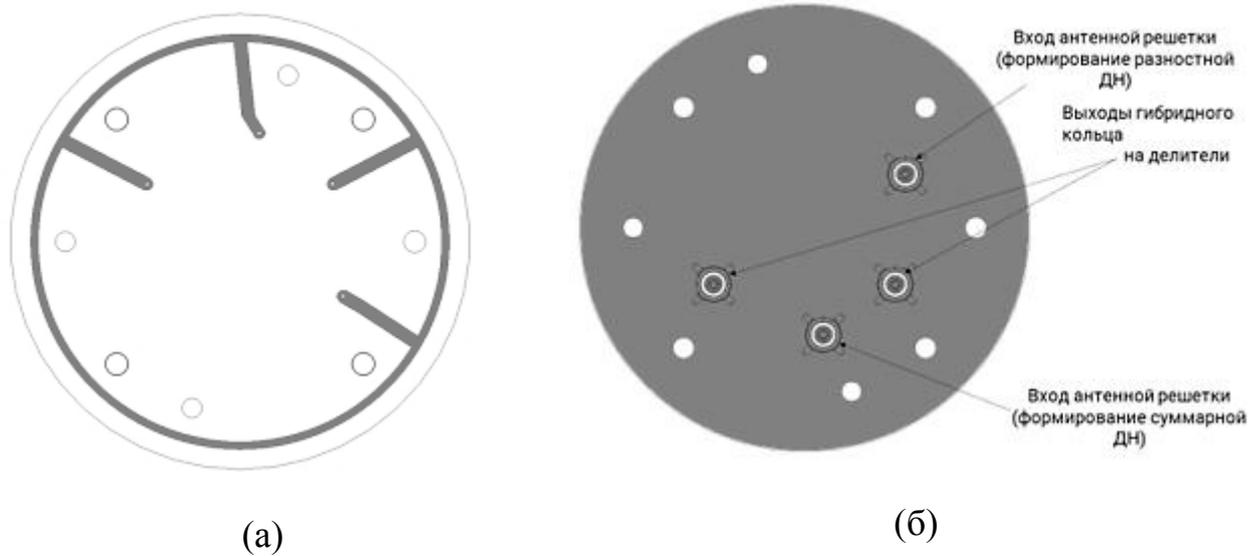


Рис. 7. Гибридное кольцо

Общий вид антенной решетки представлен на рисунке 8. АР состоит из двух подрешёток, объединённых гибридным кольцом. Каждая подрешетка состоит из восьми излучателей круговой поляризации, объединенных микрополосковым делителем. Данная конструкция АР может быть масштабирована без существенных изменений технологического цикла изготовления и монтажа устройств.

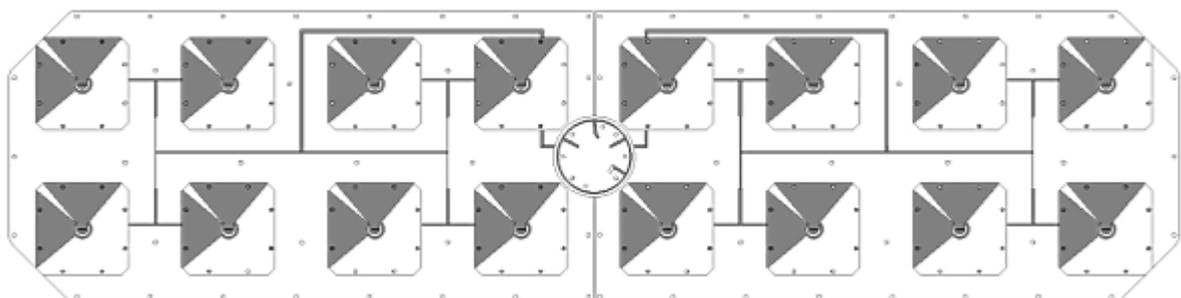


Рис. 8. Общий вид АР

Электродинамическая модель АР с гибридным кольцом

С помощью электродинамического моделирования были получены характеристики разработанной АР. АР обеспечивает работу в полосе частот от 1 ГГц до 1,9 ГГц с КСВ не выше 2 (рисунок 9, а). Коэффициент эллиптичности имеет уровень ниже 3дБ в полосе от 1,25 ГГц до 1,86 ГГц (рис.9, б).

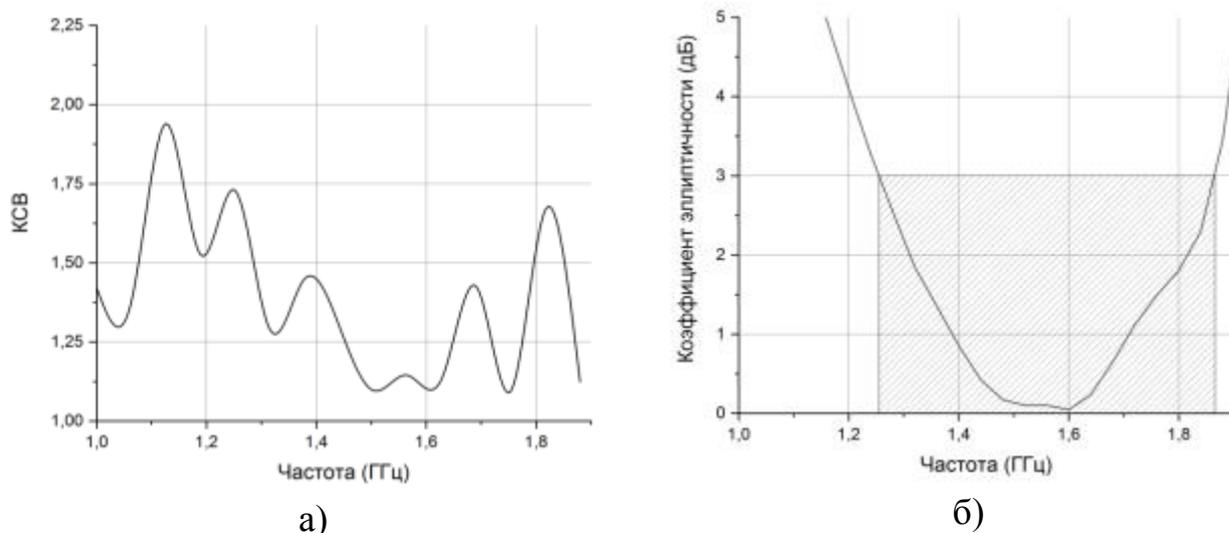


Рис. 9. Расчетные характеристики АР: а) частотная зависимость КСВ; б) частотная зависимость коэффициента эллиптичности

В результате расчета была получена частотная зависимость КУ (рисунок 10). В рабочей полосе частот виден небольшой перепад (1 дБ) уровня КУ.

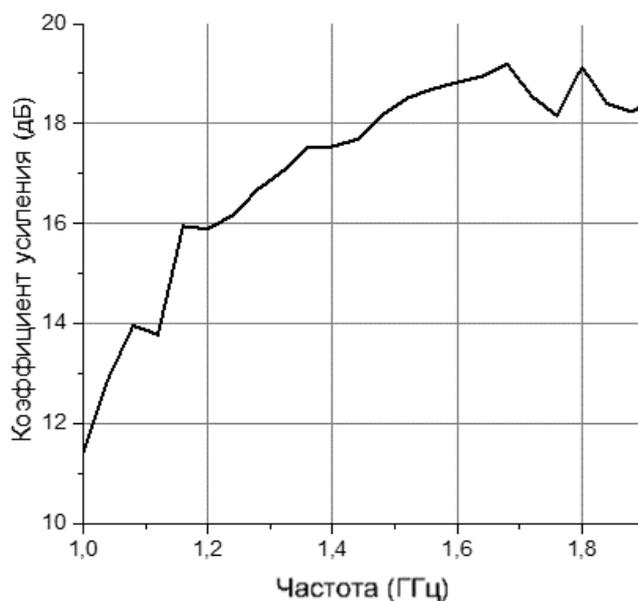


Рис.10. Частотная зависимость КУ АР

Также в результате расчёта были получены суммарная ДН в азимутальной и угломестной плоскостях и разностная ДН АР в азимутальной плоскости на частоте 1,518 ГГц. Ширина главного лепестка суммарной ДН в азимутальной плоскости составляет 43° , в угломестной плоскости 10° (рисунок 11). Значение КУ в главном направлении для разностной ДН АР в угломестной плоскости составляет -10дБ (рисунок 12.).

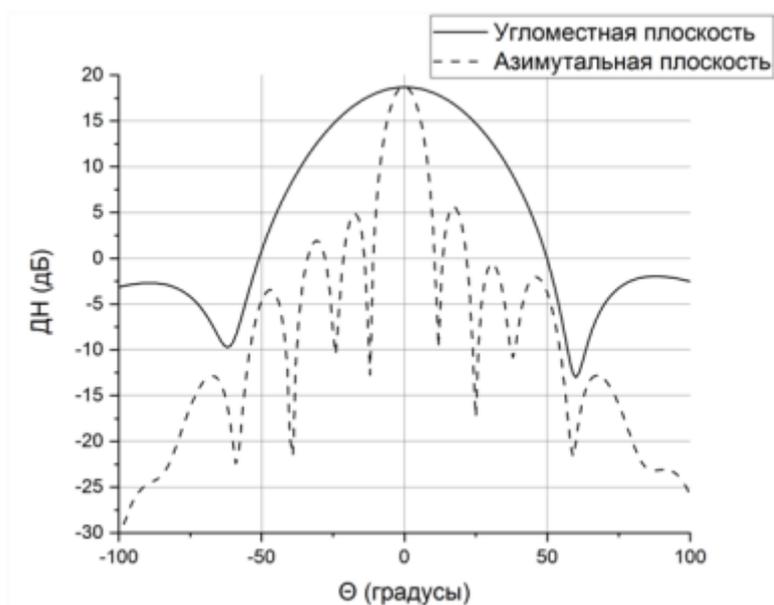


Рис. 11. Суммарная ДН АР

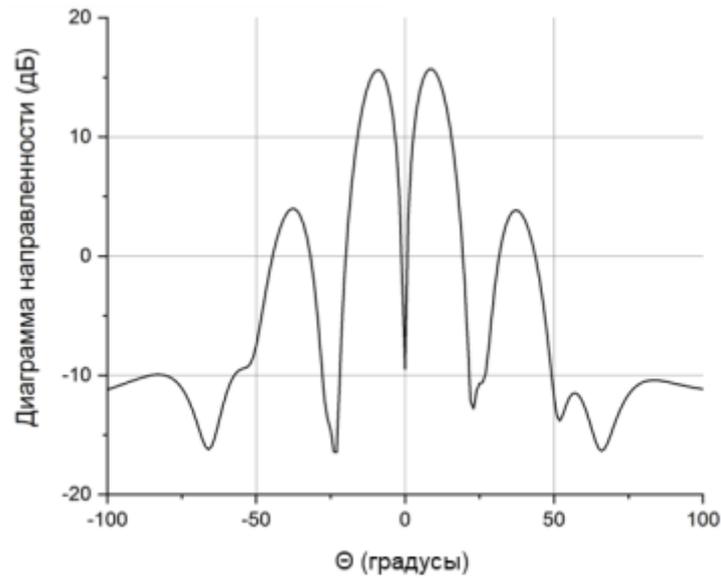


Рис. 12. Разностная ДН АР в угломестной плоскости

Экспериментальное исследование АР

Была изготовлена разработанная модель АР. Общий вид изделия и его фрагмента представлены на рисунке 13.

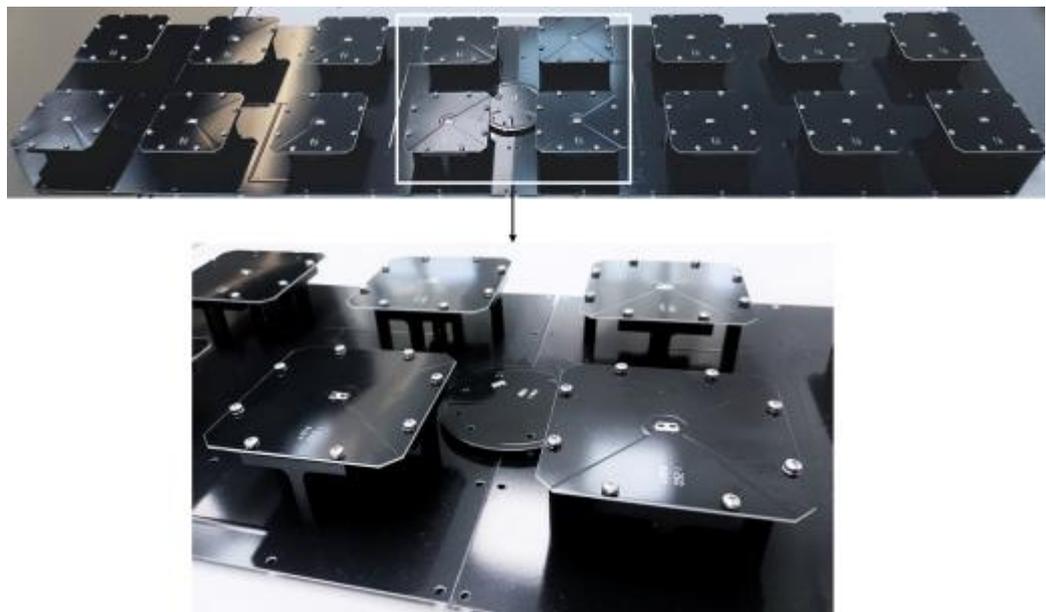


Рис.13. Вид изготовленной АР и ее фрагмента

Излучающие характеристики АР были получены с помощью автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса. На рисунках 14, 15 и 16 приведено сравнение расчетных и измеренных характеристик АР.

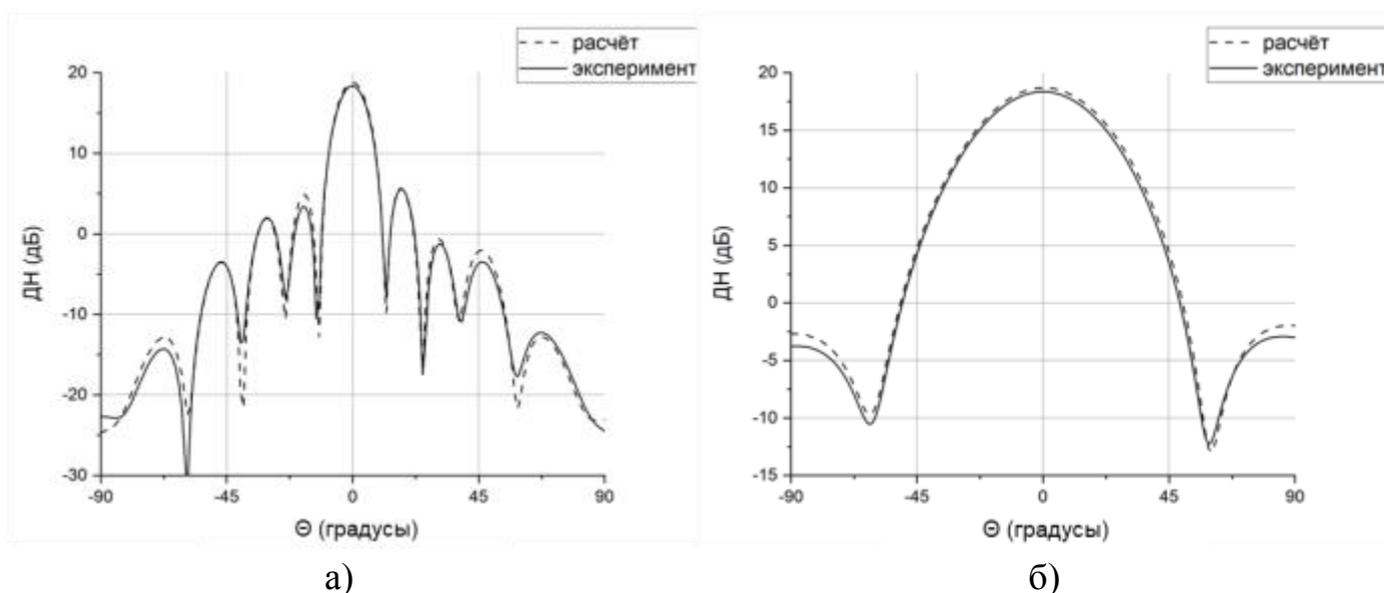


Рис.14. Сравнение расчётной и измеренной ДН на частоте 1,518ГГц:
а) азимутальная плоскость; б) угломестная плоскость

ШДН для антенной решетки в азимутальной плоскости составляет 40° , что на 3° уже, чем расчётная (43°). Измеренный коэффициент усиления составляет 18,2 дБ, что на 0,3дБ ниже расчетного (рис.14).

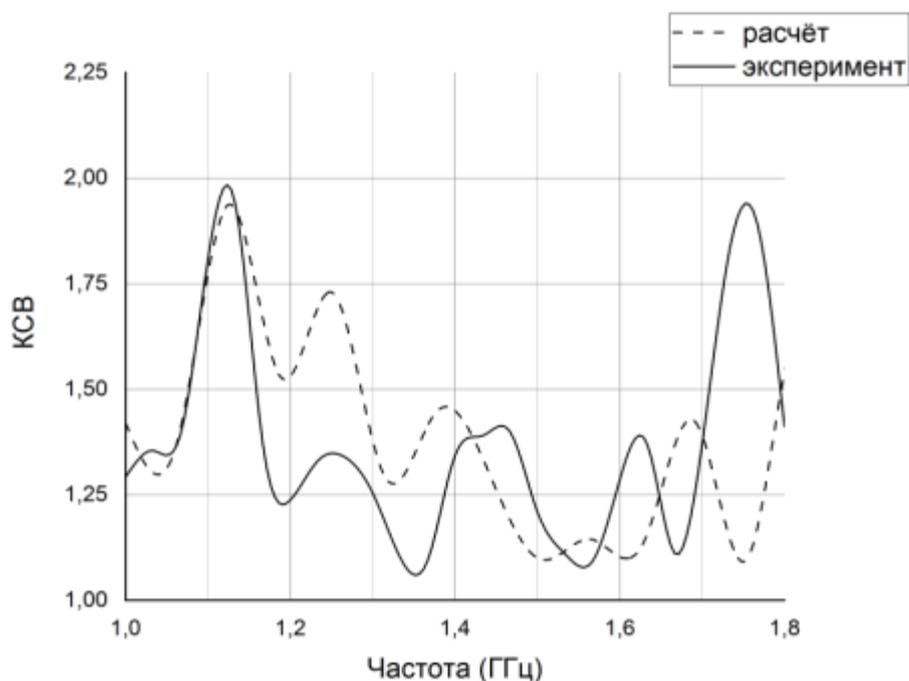


Рис.15. Сравнение расчётного и измеренного КСВ

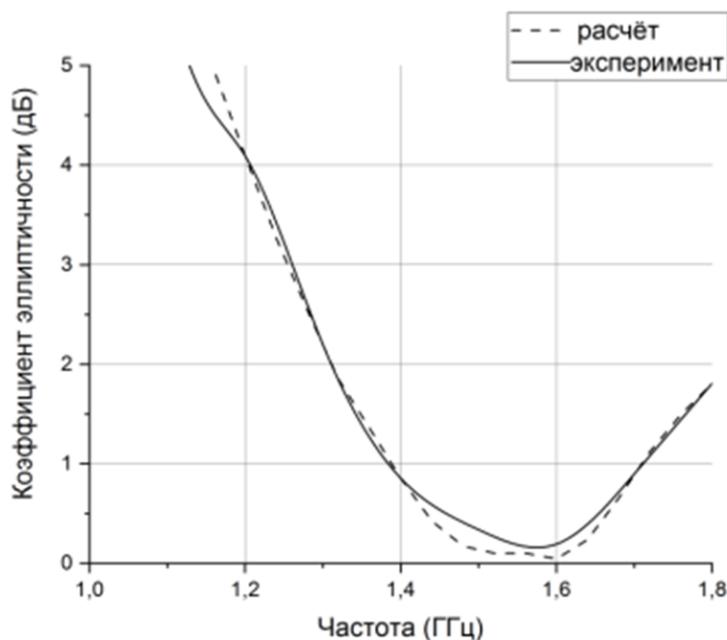


Рис.16. Сравнение расчётного и измеренного коэффициента эллиптичности

Измерения показали, что АР работает в полосе от 1ГГц до 1,8ГГц по уровню КСВ 2 (рис. 15), коэффициент эллиптичности ниже 3 дБ в полосе от 1,27 ГГц до 1,8ГГц (рис. 16).

В таблице 2 приведено сравнение характеристик разработанных одиночного излучателя и АР с характеристиками рассмотренных аналогов.

Таблица 2. Сравнение разработанного излучателя с аналогами

Вид излучателя	Высота профиля	Полоса частот	Полоса коэффициента эллиптичности	Габаритные размеры излучателя
Разработанный излучатель	$0,1\lambda_n$	75%	54%	$0,3\lambda_n \times 0,3\lambda_n$
Разработанная АР из 16 элементов	$0,1\lambda_n$	62%	39%	$0,4\lambda_n \times 1,58\lambda_n$
Скращенные диполи с паразитными патчами [13]	$0,13\lambda_n$	77,6%	66%	$0,48\lambda_n \times 0,48\lambda_n$
Диполь-бабочка [14]	$0,22\lambda_n$	52%	38%	$0,32\lambda_n \times 0,32\lambda_n$
Диполь-бабочка [15]	$0,19 \lambda_n$	22%	11%	$D = 0,27 \lambda_n$
Диполь в форме косы [16]	$0,19 \lambda_n$	22%	5%	$D = 0,25 \lambda_n$

λ_n - длина волны на нижней частоте

Выводы

1. Разработанный широкополосный излучатель с круговой поляризацией имеет высоту профиля ниже на 24% относительно излучателя с наименьшей высотой профиля и аналогичными характеристиками.

2. Разработанный низкопрофильный излучатель с круговой поляризацией имеет ширину полосы рабочих частот 75% по уровню КСВ - 2, ширина полосы коэффициента эллиптичности по уровню 3дБ - 54%. Антенная решетка из 8×2 таких излучателей имеет полосу частот - 62% по уровню КСВ 2 и ширину полосы коэффициента эллиптичности - 39%.

3. В результате экспериментального исследования изготовленной АР 8×2 излучателей, установлено, что в полосе 57% уровень КСВ не превышает 2, коэффициент эллиптичности ниже 3 дБ в полосе 34%. Отличие расчётного и измеренного уровня диаграммы направленности составило не более 0,3 дБ.

Литература

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования (4-е издание). М: Радиотехника, 2010. 800 с.

2. Середа А.Ю., Детюк К.В. Бортовой информационно-навигационный комплекс КА «Глонасс-К» // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/906.

3. Shiqiang Fu, Yuan Cao, Yue Zhou, Shaojun Fang. Improved Low-Profile Helical Antenna Design for INMARSAT Applications // International Journal of Antennas and Propagation, 2012. Volume 2012. 5 p.

4. Маркина Ю.И. Антенна GPS круговой поляризации в диапазоне 1,2 – 1,6 ГГц // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/917.

5. WenL., Min W., Yong jinJ., Zhao C. Design of a Wideband Circularly Polarized Microstrip Antenna for Compass and GPS // 2013 International Conference on Computation Problem-Solving (ICCP), Jiuzhai, China, 2013, pp.195-198.

6. He Y., He W., and Wong H. A Wideband circularly polarized cross-dipole antenna // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett, Jan. 2014. vol. 13, pp. 67–70.

7. Афанасьев П.О., Мануилов М.Б., Следков В.А. Ненаправленные низкопрофильные антенны с вертикальной поляризацией. // Труды IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИПЭ РАН, 29 ноября - 3 декабря 2010 г., с.585-595.

8. Седельников Ю.Е., Садыков А.Р., Скачков В.А. Многолучевые антенны для спутниковых систем связи // Радиолокация, навигация, связь. Сб. трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (г. Воронеж, 18–20 апреля 2023 г.), т. 4, с.143-149.

9. Pozar D. M. and Duffy S. M. A Dual-band circularly polarized aperture-coupled stacked microstrip antenna for global positioning satellite // IEEE Trans. Antennas Propag., Nov. 1997. vol. 45, no. 11, pp. 1618–1625.

10. Pan M. C. and Wong K. L. Broadband circularly polarized microstrip antenna with a dual-perpendicular feed // Microw. Opt. Technol. Lett., Mar. 2000. vol. 24, no. 6, pp. 420–422.

11. Iwasaki H. A Circularly polarized small size microstrip antenna with a cross slot // IEEE Trans. Antennas Propag., Oct. 1996. vol. 44, no. 10, pp. 1399–1401.

12. Lee J. H. and Woo J. M. Design of a L-type aperture coupled circular polarization patch antenna with a single feed // Proc. 5th Antennas, Propag. EM Theory Int. Symp., Beijing, China, Aug. 2000, pp. 14–17.

13. Wang L., Fang W–Y., En Y.–F., Huang Y. Wideband Circularly Polarized Cross-Dipole Antenna With Parasitic Elements // IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 35097-35102.

14. Huy Hung Tran, Son Xuat Ta, Ikmo Park. Single-Feed, Wideband, Circularly Polarized, Crossed Bowtie Dipole Antenna for Global Navigation Satellite Systems // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. 2014 pp.299-305.

15. Chen Y., Li G., Liu P., Bian L. and Yi B. Wideband, circularly polarized, crossed, bowtie dipole antenna for navigation satellite system // 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2017, pp.2649-2652.

16. Xuat Ta S., Han J. J., Ziolkowski R. W., and Park I. Wide-beam Circularly Polarized Composite Cavity-Backed Crossed Scythe-Shaped Dipole // 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC), pp.1085-1087.

References

1. Perov A.I., Kharisov V.N. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya (4-e izdanie). [GLONASS. Principles of construction and functioning (4th edition)]. M: Radiotekhnika, 2010. 800 p.
2. Sereda A.Yu., Detyuk K.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/906.
3. Shiqiang Fu, Yuan Cao, Yue Zhou, Shaojun Fang. International Journal of Antennas and Propagation, 2012. Volume 2012. 5 p.
4. Markina Yu.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/917.
5. Wen L., Min W., Yong jin J., Zhao C. 2013 International Conference on Computation Problem-Solving (ICCP), Jiuzhai, China, 2013, pp.195-198.
6. He Y., He W., and Wong H.A IEEE Antennas Wireless Propag. Lett, Jan. 2014. vol. 13, pp. 67–70.
7. Afanas'ev P.O., Manuilov M.B., Sledkov V.A. Trudy IV Vserossiyskoy konferentsii «Radiolokatsiya i radiosvyaz'», IRE RAN, 29 noyabrya - 3 dekabrya 2010 g., pp.585-595.
8. Sedel'nikov Yu.E., Sadykov A.R., Skachkov V.A. Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'. Sb. trudov XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu kafedry radiofiziki VGU (g. Voronezh, 18–20 aprelya 2023 g.), t. 4, pp.143-149.

9. Pozar D. M. and Duffy S. M. A IEEE Trans. Antennas Propag., Nov. 1997. vol. 45, № 11, pp. 1618–1625.
10. Pan M. C. and Wong K. L. Microw. Opt. Technol. Lett., Mar. 2000. vol. 24, no. 6, pp. 420–422.
11. Iwasaki H. A IEEE Trans. Antennas Propag., Oct. 1996. vol. 44, no. 10, pp. 1399–1401.
12. Lee J. H. and Woo J. M. Proc. 5th Antennas, Propag. EM Theory Int. Symp., Beijing, China, Aug. 2000, pp. 14–17.
13. Wang L., Fang W–Y, En Y.–F., Huang Y. IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 35097-35102.
14. Huy Hung Tran, Son Xuat Ta, Ikmo Park. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2014, pp.299-305.
15. Chen Y., Li G., Liu P., Bian L. and Yi B. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2017, pp.2649-2652.
16. Xuat Ta S., Han J. J., Ziolkowski R. W., and Park I. 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC), pp.1085-1087.

Дата поступления: 22.04.2024

Дата публикации: 1.06.2024