

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНФОРМНЫХ СТРУКТУР И МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ В АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Бузов А.Л.¹, Вдовченко Е.С.², Минкин М.А.¹, Морозов Д.В.², Нещерет А.М.^{1,2}

¹Самарское инновационное предприятие радиосистем, Самара, РФ

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: mma@siprs.ru

Требования к антеннам радиотехнических устройств различного назначения, размещаемых на мобильных объектах, постоянно возрастают. Это относится, прежде всего, к характеристикам назначения, но существенными являются также аэродинамические и массогабаритные характеристики, а также характеристики устойчивости к внешним воздействиям. Перспективным направлением исследований в целях создания новых поколений антенн для мобильных объектов является исследование конформных антенн, форма которых соответствует поверхности носителя. При этом в качестве конформных структур могут использоваться не только традиционные излучатели (ансамбли излучателей), но и планарные метаматериалы (метаповерхности), в том числе с киральными свойствами. В статье приведены результаты исследования характеристик метаповерхностей на основе S-элементов и гаммадионов. Проведенные исследования, включая экспериментальные, подтверждают перспективность дальнейшей деятельности в области использования конформных структур и метаповерхностей в составе антенных систем подвижных объектов. Сформулированы ближайшие задачи исследований в этой области.

Ключевые слова: антенны мобильных объектов, конформные антенны, метаповерхности, S-элементы, гаммадионы, метаповерхность-экран, метаповерхность-рефлектор

Введение

Мобильные (подвижные) объекты размещения различных радиотехнических устройств и комплексов военного, гражданского и двойного назначения находят все более широкое применение [1] в современном мире. В настоящее время это – пилотируемые и беспилотные летательные аппараты, боевые, транспортные, специальные, дорожные, строительные и сельскохозяйственные машины, роботизированные боевые и транспортные комплексы, маломерные корабли и суда, в том числе безэкипажные, и многое другое. На мобильных объектах размещаются комплексы радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоэлектронной разведки, радиоэлектронной борьбы и т.п. Одновременно с расширением сфер применения подобных объектов постоянно возрастают требования к тактико-техническим характеристикам их обслуживания, включая антенно-фидерное. При этом существенно возрастают требования не только к характеристикам назначения, но и к массогабаритным и аэродинамическим характеристикам антенн.

Конформные антенны мобильных объектов

Одним из быстро развивающихся перспективных направлений в области создания новых по-

колений антенн для мобильных объектов является применение конформных антенн, т.е. антенн, форма которых соответствует поверхности носителя [2]. При этом могут использоваться не только одиночные конформные излучатели [3], но и системы (решетки) таких излучателей [4].

Наиболее распространенными типами конформных антенн являются низкопрофильные полосковые структуры [3–6], которые устанавливаются на корпус (кузов, фюзеляж) носителя, в том числе на плоскости и фюзеляжи летательных аппаратов, включая беспилотные. Интересным направлением в области создания конформных антенн являются интегрированные антенные модули на основе современных композиционных материалов [6], обеспечивающие интеграцию антенны в несущую обшивку корпуса беспилотного аппарата и обладающие рядом значительных преимуществ перед классическими системами (рисунок 1).

Менее известной, но весьма перспективной разновидностью конформных антенн являются проволочные конформные антенны, в том числе магнитные [7], образованные проводниками, размещенными на корпусе объекта (рисунок 2).

Подобные конструкции могут быть реализованы в относительно низкочастотных диапазонах, включая декаметровый диапазон (ДКМВ).



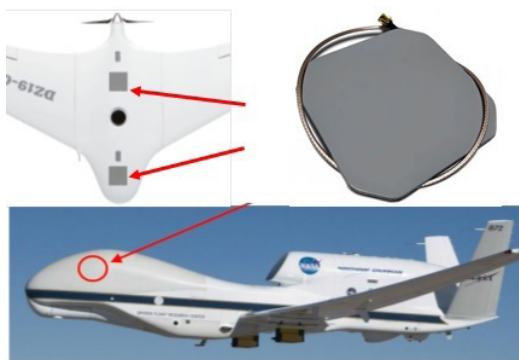


Рисунок 1. Конформные антенны на основе интегрированных антенных модулей [5; 6]

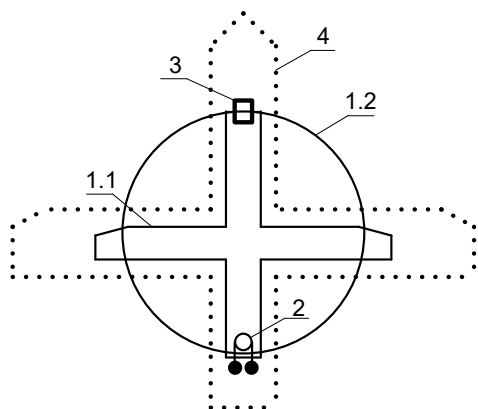


Рисунок 2. Проволочная конформная антенна [7]

Обозначения на рисунке 2: 1.1 – полотно антенны, 1.2 – эквивалентная рамка, 2 – петля связи, 3 – балластная нагрузка, 4 – корпус объекта.

Аналогичные решения могут быть использованы и при разработке антенн для наземных подвижных объектов. Проведенный анализ опыта их применения позволил выявить, как минимум, две задачи по совершенствованию их антенн. Прежде всего, это потребность в обеспечении механической прочности и устойчивости к воздействию ударов о местные предметы в движении. Применение конформных антенн практически устраняет эту проблему, поскольку антенна почти не выступает за габариты объекта.

Кроме того, в ряде случаев необходимо обеспечить прием волн горизонтальной поляризации с горизонтальных направлений, что для традиционных антенн при их близком расположении к корпусу объекта крайне затруднительно. Решение этой проблемы может быть обеспечено путем использования конформных структур в виде планарных метаматериалов (метаповерхностей) [8], в том числе с киральными свойствами, обеспечивающих в месте установки антенны на корпусе объекта высокоимпедансную подстилающую поверхность со свойствами, близкими к магнитному экрану.

Метаповерхности

Метаповерхность [8; 9] представляет собой упорядоченный или квазихаотичный двумерный массив из плоских элементов субволновых размеров. Достоинства планарных метаматериалов, по сравнению с объемными, достаточно хорошо известны. Прежде всего, они более технологичны благодаря возможностям использования технологий полосковых и печатных плат. Кроме того, они имеют лучшие массогабаритные и технико-экономические характеристики.

В качестве плоских элементов метаповерхностей используются различные субволновые, в том числе киральные, элементы. В числе симметричных элементов следует отметить замкнутые, незамкнутые и концентрические кольца, I-образные элементы, прямоугольные и многоугольные плоские рассеиватели. Киральные элементы представлены плоскими спиралями, S-элементами, Ω -элементами, гаммадионами и т.д. [10].

Методы математического моделирования метаповерхностей достаточно многообразны [8; 9; 11] и обеспечивают строгое или приближенное описание отдельного элемента, учет геометрии ансамбля, расчет эквивалентных параметров и дисперсионных характеристик поверхности и т.д.

В то же время, для метаструктуры относительно небольших конечных размеров использование современных программных средств позволило решать задачи моделирования метаповерхности на основе строгой электродинамической модели, непосредственно включающей весь ансамбль элементов и, таким образом, учитывающей все существенные факторы.

Были проведены исследования характеристик метаповерхностей на основе S-элементов и гаммадионов. Исследовались конечные апертуры (панели), содержащие упорядоченные двумерные ансамбли плоских S-элементов (матрица 6x14) и гаммадионов (матрица 6x6).

На рисунке 3 приведены результаты расчета частотных характеристик нормированного эквивалентного поверхностного тока на метаповерхностях при их возбуждении плоской нормально падающей волной (нормирование условное).

В обоих случаях наблюдаются ярко выраженные резонансные свойства эквивалентного поверхностного импеданса. На резонансных частотах метаповерхности ведут себя как проводящие плоскости и могут выполнять функции экранов или рефлекторов, а вдали от резонансных частот они возбуждаются слабо и близки к диэлектрикам.

Резонансные частоты для S-элементов и гаммадионов достаточно близки. Добротность для

гаммадионов, как и следовало ожидать, несколько выше.

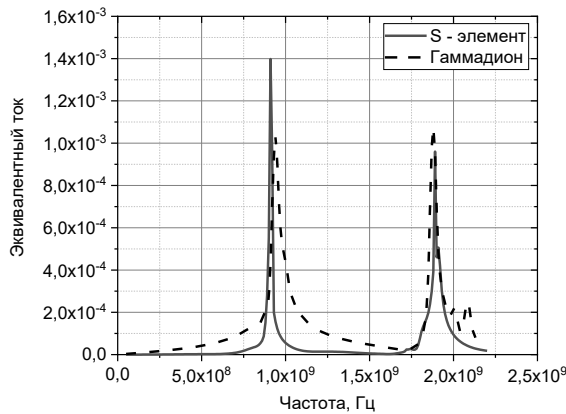


Рисунок 3. Расчетные характеристики метаповерхностей

Экспериментальные исследования

Для экспериментального исследования характеристик метаповерхностей были изготовлены макеты, представляющие собой панели на основе S-элементов и гаммадионов с топологией, соответствующей ранее рассчитанным структурам, выполненные путем наклеивания плоских металлических элементов на диэлектрик (рисунок 4) [12].

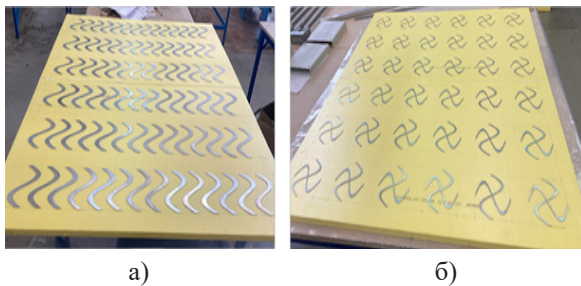


Рисунок 4. Макеты метаповерхностей на основе S-элементов (а) и гаммадионов (б) [12]

Экспериментальное исследование макетов включало измерение коэффициента передачи между измерительной и вспомогательной антеннами (рисунок 5) при отсутствии панели, при установке панели между антеннами (панель-экран) и при ее установке за вспомогательной антенной (панель-рефлектор).

Такой подход позволил в широкой полосе частот оценить эффекты, возникающие при установке экрана (рефлектора), по сравнению с исходной характеристикой коэффициента передачи между двумя антеннами.

На рисунке 6 приведены экспериментальные характеристики соответствующих коэффициентов передачи для метаповерхности (панели) из S-элементов.



Рисунок 5. Проведение измерений [12]

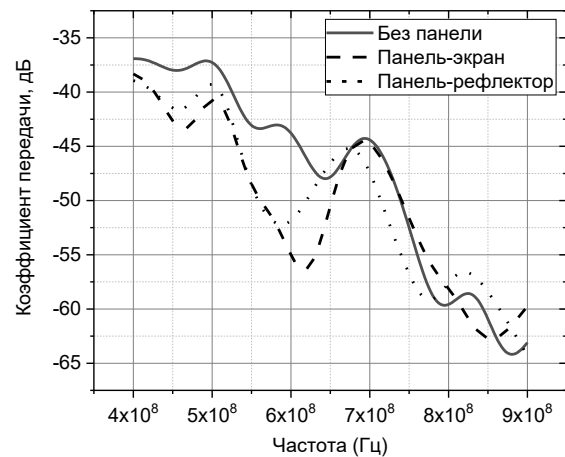


Рисунок 6. Экспериментальные характеристики панели из S-элементов [12]

На частотах, близких к резонансной (примерно 620 МГц), наблюдается достаточно эффективное экранирование: коэффициент передачи примерно на 10 дБ меньше, чем без экрана. В то же время, в режиме «панель-рефлектор» на этих частотах коэффициент передачи не только не увеличивается, но заметно снижается. Это связано, по-видимому, с киральностью элементов (а значит и метаповерхности в целом), благодаря которой имеет место эффективное рассеяние волны в направлениях, параллельных плоскости панели [13].

Указанный эффект требует проведения дальнейших исследований, однако уже сейчас можно предполагать возможности его использования для формирования пространственных характеристик антенных систем, а также для создания конформных структур (покрытий), снижающих радиолокационную заметность объектов установки.

На рисунке 7 приведены аналогичные характеристики коэффициентов передачи для панели из гаммадионов. В этом случае наблюдаются аналогичные закономерности, однако эффект парадоксальной работы рефлектора выражен не столь явно, что может быть связано с более высоким порядком поворотной симметрии элемента.

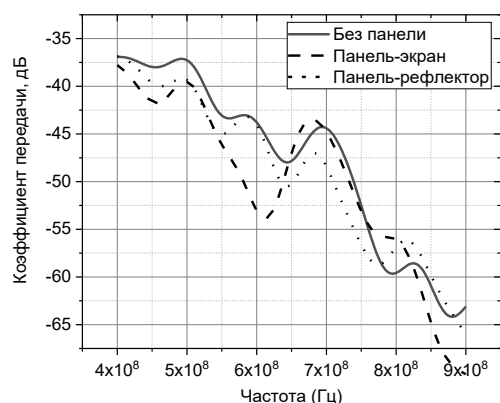


Рисунок 7. Экспериментальные характеристики панели из гаммадионов [12]

Заключение

Проведенные исследования, включая экспериментальные, подтверждают перспективность дальнейшей деятельности, направленной на создание антенных систем подвижных объектов на основе конформных структур и метаповерхностей.

Предварительно могут быть сформулированы ближайшие задачи исследований [1]:

- обоснование путей решения основных проблем в области антенн подвижных объектов на основе применения конформных структур и метаструктур на объектах различных типов и разного назначения;
- исследование характеристик метаповерхностей на основе элементарных рассеивателей различных типов в зависимости от их электрических размеров, ориентации, характера и плотности размещения;
- разработка методов и технологий формирования импедансных поверхностей с заданными свойствами;
- исследование характеристик двухслойных и многослойных метаструктур;
- исследование возможностей использования конформных структур и метаструктур, в том числе многослойных, для снижения радиолокационной заметности объектов;
- разработка антенн, маскирующих покрытий и т.п. для мобильных объектов на основе конформных структур и метаповерхностей.

Литература

1. Вдовченко Е.С., Минкин М.А. Перспективы создания антенных систем для мобильных объектов на основе конформных структур и метаповерхностей // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций (ПТиТТ-2024): материалы XXVI Международной научно-технической конференции. Самара: ПГУТИ, 2024. С. 322–323.

2. ГОСТ Р 55787-2013. Устройства для радиосвязи, радиовещания и телевидения антенно-фидерные. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.
3. Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Дерачиц Д.С. Исследование низкопрофильных конформных микрополосковых антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3 (164). С. 240–248.
4. Король Д.Г., Темченко В.С. Исследование цилиндрической конформной антенной решетки с печатным излучателем для БПЛА // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/29b/o03p1pkj6rzihoih5csk125pzpnyedjd/14_Korol_Temchenko.pdf?lang=ru&issue=129 (дата обращения: 10.10.2024).
5. Conformal, lightweight, aerogel-based antenna // NASA Technology Solution. URL: <https://ntts-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/LEW-TOPS-155.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
6. Интегрированные антенные модули AS-18 // DZUAV – антенные модули. URL: <https://dozor-avia.ru/produkty/sistemy-svyazi/antennnye-moduli-as-18> (дата обращения: 10.10.2024).
7. Ананьев А.В., Катруша А.Н. Контурная антенна ДКМВ-диапазона для беспилотных летательных аппаратов // Антенны. 2017. № 8 (240). С. 45–52.
8. Li A., Singh S., Sievenpiper D. Metasurfaces and their applications // Nanophotonics. 2018. Vol. 7, no.6. P.989–1011. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0120
9. Вдовченко Е.С., Минкин М.А. Характеристики рассеяния электромагнитных волн на метаповерхности при различных типах и геометрии планарных элементов // Физика и технические приложения волновых процессов (ФитПВП-2024): материалы XXI Международной научно-технической конференции. Самара: ПГУТИ, 2024. С. 123–124.
10. Вендик И.Б. Гибкие антенны и импедансные поверхности для беспроводных систем на поверхности человеческого тела // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 167–172.
11. Сацкий А.В., Перов Н.С. Локальная магнитная проницаемость метаповерхности в МГц- и ГГц-диапазонах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2024. № 3. С. 2430502-1–2430502-9.
12. Бузов А.Л., Копылов Д.А., Нещерет А.М. Экспериментальное исследование излучающих

структур с подложками из планарного кирального метаматериала на основе S-элементов и гаммадионов // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 6. С. 136–142. DOI: 10.18127/j00338486-202306-18

13. Характеристики излучения микрополосковой антенны с подложкой из кирального метаматериала / Д.С. Ключев [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 505–515.

Дата поступления 25.11.2024

Дата принятия 25.12.2024

Бужов Александр Львович, д.т.н., профессор, генеральный директор Самарского инновационного предприятия радиосистем (СИП РС). 443052, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 26Б. Тел. +7 846 203-23-14. E-mail: info@siprs.ru

Вдовченко Евгений Станиславович, соискатель кафедры систем специальной радиосвязи (ССРС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: natashok120391@mail.ru

Минкин Марк Абрамович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник СИП РС. 443052, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 26Б. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: mma@siprs.ru

Морозов Денис Владимирович, соискатель кафедры ССРС ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: backs.84@rambler.ru

Нешчерет Анатолий Михайлович, д.ф.-м.н., заместитель начальника научного отдела СИП РС. 443052, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 26Б; профессор кафедры радиоэлектронных систем ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: nam@siprs.ru

UDC 621.396.676

DOI: 10.18469/ikt.2024.22.4.04

PROSPECTS OF USING CONFORMAL STRUCTURES AND META-SURFACES IN ANTENNA SYSTEMS OF MOBILE OBJECTS

Buzov A.L.¹, Vdovchenko E.S.², Minkin M.A.¹, Morozov D.V.², Neshcheret A.M.^{1,2}

¹*Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, Samara, Russian Federation*

²*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

E-mail: mma@siprs.ru

A promising area of research in order to create new generations of antennas for mobile objects is the study of conformal antennas, the shape of which corresponds to the carrier surface. In this case, not only traditional radiators (arrays of radiators), but also planar metamaterials (metasurfaces), including those with chiral properties, may be used as conformal structures. The article presents the results of the study of the characteristics of meta-surfaces based on S-elements and gammadiodes. The conducted studies, including experimental ones, confirm the prospects for further activity in the field of using conformal structures and meta-surfaces as a part of antenna systems of mobile objects. The immediate research objectives in this area are indicated.

Keywords: *mobile object antennas, conformal antennas, metasurfaces, S-elements, gammadiodes, metasurface-screen, metasurface-reflector*

Buzov Alexander Lvovich, Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, 26B, Zemets Street, Samara, 443052 Russian Federation; General Director, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 203-23-14. E-mail: info@siprs.ru

Vdovchenko Evgeny Stanislavovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Applicant of Special Radio Communication Systems Department. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: natashok120391@mail.ru

Minkin Mark Abramovich, Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, 26B, Zemets Street,

Samara, 443052, Russian Federation; Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: mma@siprs.ru

Morozov Denis Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Applicant of Special Radio Communication Systems Department. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: backs.84@rambler.ru

Neshcheret Anatoly Mikhailovich, Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, 26B, Zemets Street, Samara, 443052 Russian Federation; Deputy Head of the Scientific Department, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Radio Electronic Systems Department, Doctor of Physics and Mathematics. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: nam@siprs.ru

References

1. Vdovchenko E.S., Minkin M.A. Prospects for creation of antenna systems for mobile objects based on conformal structures and meta-surfaces. *Problemy tekhniki i tekhnologij telekommunikacij (PTiTT-2024): materialy XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii*. Samara: PGUTI, 2024, pp. 322–323. (In Russ.)
2. GOST R 55787-2013. Antenna-feeder devices for radio communications, radio broadcasting and television. Terms and definitions. Moscow: Standartinform, 2015, 22 p. (In Russ.)
3. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Derachic D.S. Study conformal low-profile patch antenna. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 3 (164), pp. 240–248. (In Russ.)
4. Korol' D.G., Temchenko V.S. Investigation of a cylindrical conformal antenna array with a printed radiator for UAVs. *Trudy MAI*. 2023. № 129. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/29b/o03pipkj6rzihoih5csk125pzyndjd/14_Korol_Temchenko.pdf?lang=ru&issue=129 (accessed: 10.10.2024). (In Russ.)
5. Conformal, lightweight, aerogel-based antenna. *NASA Technology Solution*. URL: <https://ntts-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/LEW-TOPS-155.pdf> (accessed: 10.10.2024).
6. Integrated antenna modules AS-18. *DZUAV – antennnye moduli*. URL: <https://dozor-avia.ru/produkty/sistemy-svyazi/antennnye-moduli-as-18/> (accessed: 10.10.2024). (In Russ.)
7. Anan'ev A.V., Katrusha A.N. Short-wave antenna for unmanned aerial vehicles. *Antenny*, 2017, no. 8 (240), pp. 45–52. (In Russ.)
8. Li A., Singh S., Sievenpiper D. Metasurfaces and their applications. *Nanophotonics*, 2018, vol. 7, no. 6, pp. 989–1011. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0120
9. Vdovchenko E.S., Minkin M.A. Electromagnetic waves scattering characteristics on a metasurface of different types and geometry planar elements. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh processov (FiTPVP-2024): materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii*. Samara: PGUTI, 2024, pp. 123–124. (In Russ.)
10. Vendik I.B. Flexible antennas and impedance surfaces for wireless systems on the surface of the human body. *Elektronika i mikroelektronika SVCh: materialy IV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii*. Saint Petersburg: SPbGETU «LETI», 2015, pp. 167–172. (In Russ.)
11. Sackij A.V., Perov N.S. Local permeability of a metasurface in the MHz and GHz ranges. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*, 2024, no. 3, pp. 2430502-1–2430502-9. (In Russ.)
12. Buzov A.L., Kopylov D.A., Neshcheret A.M. Experimental study of radiating structures with substrates of planar chiral metamaterial based on s-elements and gammadion. *Radiotekhnika*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 136–142. DOI: 10.18127/j00338486-202306-18 (In Russ.)
13. Klyuev D.S. et al. Characteristics of radiation from a microstrip antenna on a substrate made of a chiral metamaterial. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 505–515. (In Russ.)

Received 25.11.2024

Accepted 25.12.2024