

Возможности совершенствования антенной техники путем использования киральных метаматериалов

А.Л. Бузов¹, Д.С. Клюев¹, А.М. Нещерет²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

² АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем»
443022, Российская Федерация, г. Самара
пр. Кирова, 26

Приведен обзор существующих исследований к анализу и синтезу антенн на основе метаматериалов, а также ряд новых исследований авторов по возможностям применения киральных метаматериалов в антенной технике и сетях радиосвязи. Обоснована перспективность применения метаматериалов в антенных системах сетей радиосвязи в целях совершенствования их электрических и массо-габаритных характеристик.

Ключевые слова: метаматериал, киральная среда, антенна, улучшение антенных характеристик.

Одно из перспективных направлений развития антенной техники и СВЧ-устройств напрямую связано с применением в их конструкции метаматериалов, о чем свидетельствует большое количество публикаций как в России, так и за рубежом. Благодаря их «уникальным» электродинамическим свойствам метаматериалов, активно проводятся исследования возможностей применения метаматериалов в СВЧ-устройствах (частотно- и поляризационно-селективные фильтры, преобразователи поляризации, защитные и радиопоглощающие экраны, резонаторы, волноводы, фазовращатели, концентраторы и т. д.), а также в антенной технике. Такой интерес обусловлен возможностями разработки антенн и СВЧ-устройств нового поколения, обладающих более совершенными характеристиками [1].

Существует огромное множество различных видов метаматериалов, однако с точки зрения антенной техники УВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонов, метаматериал представляет собой искусственный композиционный материал, обладающий уникальными электродинамическими свойствами, нехарактерными для природных материалов, одними из которых являются отрицательные значения эффективных диэлектрических и/или магнитных проницаемостей, и обусловленными периодической структурой из макроскопических проводящих элементов определенной формы [2].

В случае если проводящие элементы обладают зеркально-асимметричной формой (спирали, S-элементы, Ω -частицы, разомкнутые кольца и т. п.) и равномерно распределены по диэлектрическому контейнеру, то такой метаматериал называется киральным (рис. 1) [3]. Такой киральный метаматериал обладает рядом особых свойств, основными из которых являются кросс-поляризация падающего поля и круговой дихроизм, благодаря которому в среде происходит бифуркация нормальных волн на волны с лево- и правокруговыми поляризациями. Двумя основными типами киральных метаматериалов являются биизотропные метаматериалы, в которых зеркально асимметричные элементы ориентируются произвольным образом, и бианизотропные метаматериалы, в которых элементы ориентированы одинаково. Кроме того, левосторонние и правосторонние элементы также обладают различными электродинамическими эффектами [4]. В качестве примера, на рис. 1 приведен бианизотропный киральный метаматериал на основе правовинтовых спиралей.

В настоящее время обычно используются два основных подхода к изучению структур на основе киральных метаматериалов.

Первый подход, являющийся наиболее распространенным, связан с использованием программных комплексов электродинамического моделирования CST Studio, HFSS, Feko и т. п.

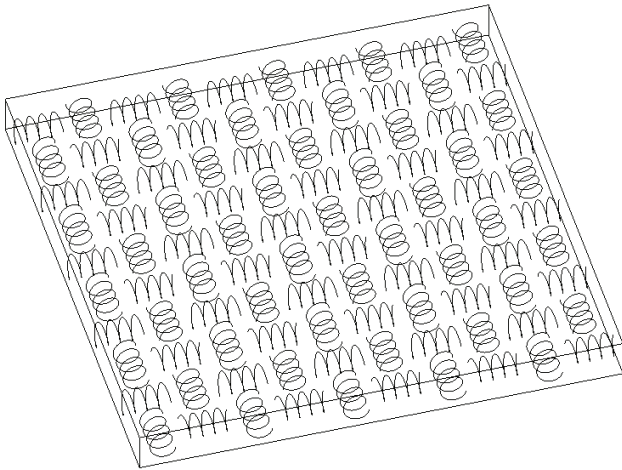


Рис. 1. Биизотропный киральный метаматериал

В основу данных программных комплексов заложен ряд численных методов (метод моментов, метод конечных элементов, и т. д.), предполагающие дискретизацию всего пространства или его части на элементарные ячейки. При недостаточном значении шага дискретизации, может произойти деформация исходной структуры объекта таким образом, что его свойства могут исказиться. С другой стороны, по мере уменьшения размеров ячеек и увеличения их числа, поле, рассчитанное с помощью этих пакетов, стремится к истинному полю в структуре, то есть имеется сходимость итерационного процесса, но решение задачи при большом количестве ячеек требует применения быстродействующих процессоров и больших объемов оперативной памяти. Кроме того, при анализе резонансных структур, в частности, киральных метаматериалов необходимо соблюдать особую аккуратность, поскольку даже небольшие искажения исходной структуры могут вызывать существенные отклонения в конечном решении.

Другим подходом к анализу киральных метаматериалов, является построение математических моделей подобных структур на основе интегральных уравнений с использованием феноменологической теории [5], которая, в свою очередь, предусматривает применение специальных материальных уравнений и выражений для электромагнитного поля [6–10]. В данных выражениях присутствует обобщенный параметр киральности χ , характеризующий степень взаимосвязи процессов электрической и магнитной поляризации в среде. Вместе с тем, значения параметра киральности для киральных метаматериалов на основе различных типов проводящих включений будут отличаться. В связи

с этим, существуют также несколько способов к его определению, одним из которых, может служить использование дисперсионных моделей Максвелла – Гарнетта [11], суть которых состоит в определении резонансной частоты структуры, путем вычисления значений емкости и индуктивности одиночного проводящего элемента. Недостатком такого подхода является приближенное определение параметра киральности и как следствие невозможность точно синтезировать антенную систему с заданными характеристиками, однако с другой стороны такой подход позволяет осуществить оценку сверху, тем самым определить перспективность использования метаматериалов в том или ином устройстве.

Существуют также и другие способы экспериментального определения эффективных материальных параметров киральных метаматериалов [12–14]. Первый способ, заключается в измерении коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн для исследуемой киральной структуры в случае двух взаимных расположений передающей и приемной рупорной антенны. При этом используется параллельное (случай кополяризации) и перпендикулярное (случай кросс-поляризации) расположение рупоров. Измеряемые коэффициенты прохождения и отражения для случая кополяризации T_{\parallel} , R_{\parallel} и для случая кросс-поляризации T_{\perp} , R_{\perp} связаны с коэффициентами прохождения T_{\pm} и отражения R_{\pm} для электромагнитных волн с правокруговой поляризацией (ПКП) и левокруговой поляризации (ЛКП) [12]:

$$\begin{aligned} T_{\pm} &= T_{\parallel} + iT_{\perp}, \\ R_{\pm} &= R_{\parallel} = R. \end{aligned} \quad (1)$$

Определяя коэффициенты прохождения для волн с ПКП и ЛКП, параметр киральности χ можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{\arg(T_{+}) - \arg(T_{-}) + 2m\pi}{2k_0d} + \\ &+ i \frac{\ln(T_{-}) - \ln(T_{+})}{2k_0d}, \end{aligned} \quad (2)$$

где d – толщина кирального метаматериала, а m – целое число, которое определяется из следующего неравенства: $-\pi < \arg(T_{+}) - \arg(T_{-}) + 2m\pi < \pi$.

Второй способ определения параметра киральности заключается в измерении угла поворота плоскости поляризации прошедшей волны θ с помощью поворота приемной рупорной антенны вокруг своей оси [15]. Угол поворота θ

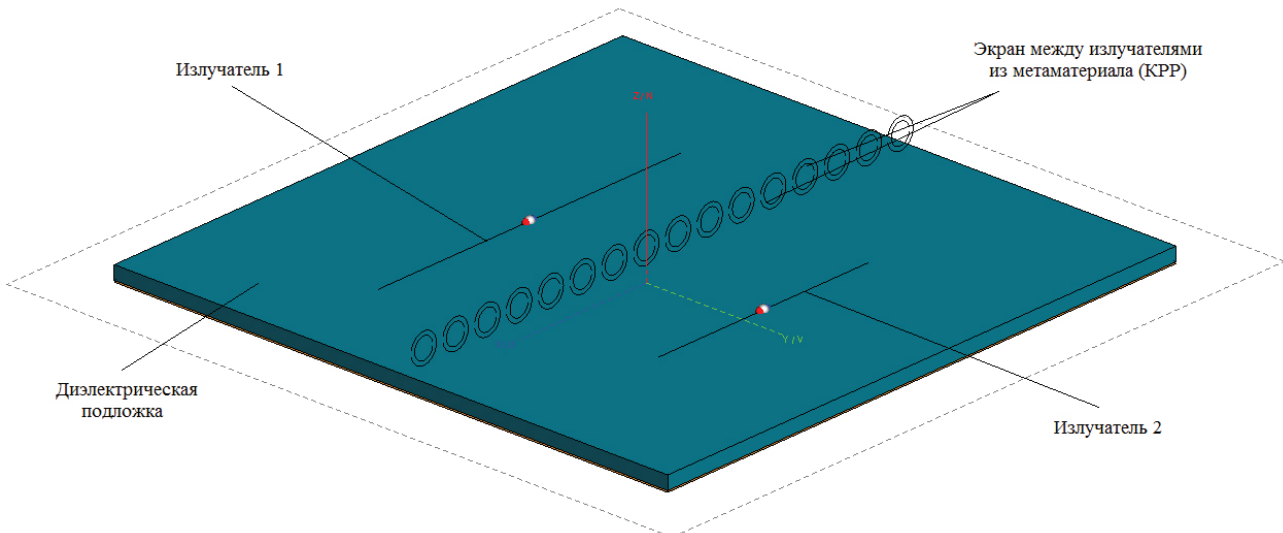


Рис. 2. Излучатели, разделенные перегородкой из метаматериала

соответствует повороту приемного рупора на такой угол, при котором коэффициент прохождения имеет наибольшее значение T_{\max} . Выражение для определения параметра киральности выглядит следующим образом:

$$\chi = \frac{\theta}{k_0 d} + i \frac{\operatorname{arctg}(\eta)}{k_0 d} \quad (3)$$

где η – коэффициент эллиптичности, определяемый как $\eta = \operatorname{arctg}(T_{\max} / T_{\min})$, где в свою очередь, T_{\min} – наименьшее значение параметра прохождения волны, определяемое при угле поворота рупора на значение $\theta + 90^\circ$.

Комбинирование данных подходов, при котором параметр киральности определяется путем электродинамического моделирования в программных комплексах, а расчет характеристик производится методом интегральных уравнений, в целом позволяет корректно анализировать и синтезировать излучающие структуры на основе киральных метаматериалов.

Рассмотрим возможности применения структур на основе метаматериалов в системах радиосвязи. Как показывает анализ литературы, применение метаматериалов в антенной технике позволяет уменьшить размеры излучателей, путем компенсации реактивной составляющей входного импеданса электрически малых антенн [16], улучшить направленные свойства, уменьшить взаимное влияние между излучателями в антенных решетках, а также обеспечить возможность излучения электромагнитных волн эллиптической поляризации плоским прямоугольным вибратором [17].

Применение метаматериалов может оказаться перспективным при обеспечении электромагнит-

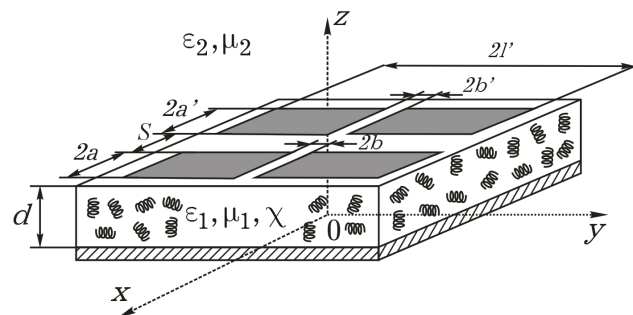


Рис. 3. Излучатели, расположенные на киральной подложке

ной совместимости радиоэлектронных средств. В работе [18] было произведено исследование нескольких вариантов излучающих структур на основе метаматериалов на предмет увеличения развязки между двумя параллельно расположенными излучателями. Была проанализирована структура, в которой излучатели разделены перегородкой из метаматериала (в частности, из кольцевых разомкнутых резонаторов) (рис. 2), также структура, в которой излучатели накрываются «колпаком» из кирального метаматериала, и, наконец, структура, в которой излучатели расположены на подложке из кирального метаматериала (рис. 3).

Как показали результаты исследований, наиболее эффективным вариантом структуры является такая структура, в которой излучатели расположены на киральной подложке. В таком случае обеспечивается развязка, значение которой в несколько раз выше, чем для структуры, в которой отсутствуют метаматериалы. На рис. 4 приведен график зависимости уровня развязки от параметра киральности для случая расположения излучателей на киральной подложке. Из представленного графика видно, что в случае

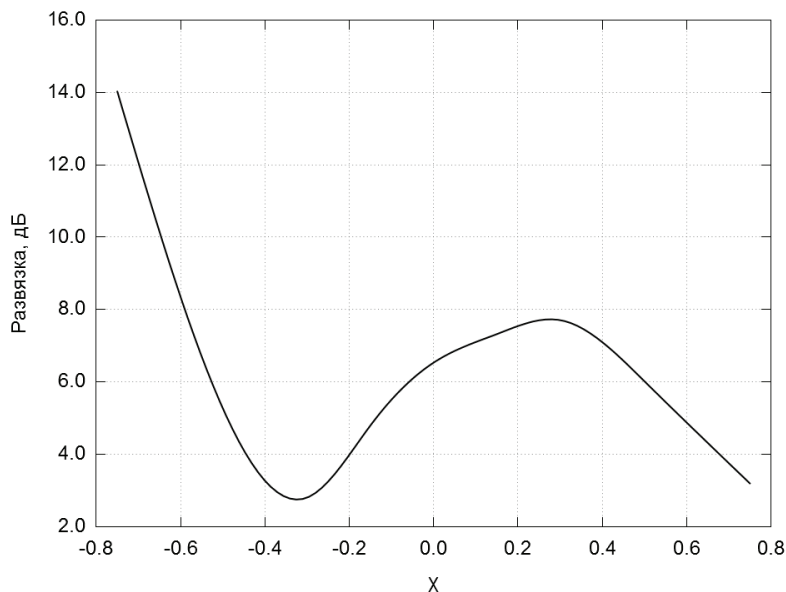


Рис. 4. Зависимость уровня развязки от параметра киральности

когда подложка выполнена из кирального метаматериала на основе правосторонних элементов (правовинтовых спиралей) при небольших значениях параметра киральности взаимное развязка увеличивается, а затем при увеличении значения параметра киральности – уменьшается. При использовании кирального метаматериала из левосторонних элементов – ситуация противоположная: при небольших значениях параметра киральности, развязка уменьшается, а затем при возрастании параметра киральности резко увеличивается, что явно свидетельствует о периодическом характере структуры. Таким образом, исследования показывают, что применение определенных киральных метаматериалов в излучающих системах небольших объектов, в целом позволяет улучшить ЭМС радиоэлектронных средств.

Кроме того, использование антенных решеток (АР) на основе киральных метаматериалов позволяет в системах ММО позволяет повысить пропускную способность [19]. Причем использование биизотропных и бианизотропных киральных метаматериалов оказывает различный эффект, ровно как и киральные метаматериалы на основе лево- и правосторонних включений. В работе [20] было установлено, пропускная способность сетей радиосвязи с использованием технологии ММО достаточно сильно зависит от величины взаимного влияния элементов антенной решетки.

В целях оценивания эффекта изменения пропускной способности от применения антенных решеток на основе метаматериалов, было вве-

дено несколько упрощений, а именно то, что корреляция сигналов в парциальных каналах ММО отсутствует, затухание и искажение сигналов в среде также отсутствуют, в точках источника и приемника установлены одинаковые антенные системы. С учетом вышеизложенного, выполнить оценку пропускной способности сети радиосвязи с ММО с учетом взаимного влияния излучателей антенной решетки позволяет выражение:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{q}{N_{TX}} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z} \mathbf{Z}^H \mathbf{H}^H (\mathbf{Z}^{-1})^H \right), \quad (4)$$

где q – уровень сигнала; N_{TX} – количество парциальных каналов; $Z_{RX} = Z_{TX} = Z$ – матрицы импедансов приемной и передающей антенных систем; \mathbf{H} – канальная матрица; \mathbf{H}^H – операция эрмитова сопряжения канальной матрицы.

Было исследовано несколько вариантов реализаций систем ММО, в которых использовались антенные решетки на основе биизотропных и бианизотропных киральных метаматериалов, а также антенные решетки с диэлектрической подложкой, относительная диэлектрическая проницаемость которой равна 1. На подложках антенных решеток параллельно друг другу на расстоянии, равном рабочей длине волны, расположены два симметричных полуволновых излучателя.

Все киральные метаматериалы выполнены на основе лево- и правовинтовых спиралей. На рис. 5 приведена электродинамическая модель антенной решетки с подложкой из биизотропного кирального метаматериала (все элементы, ориентированы хаотически), а на рис. 6 – из би-

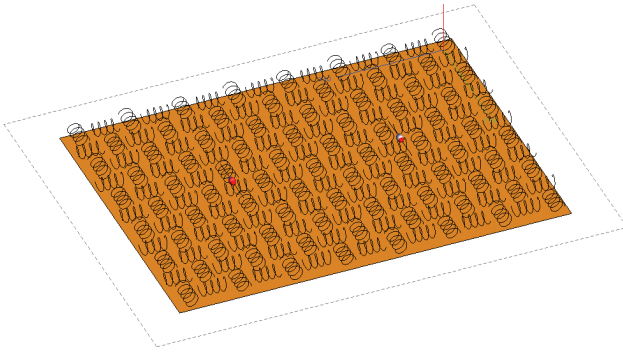


Рис. 5. АР с биизотропной подложкой

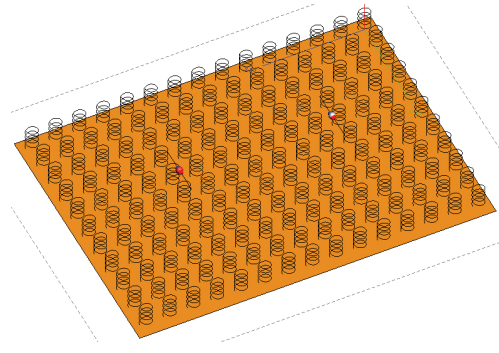


Рис. 6. АР с бианизотропной подложкой

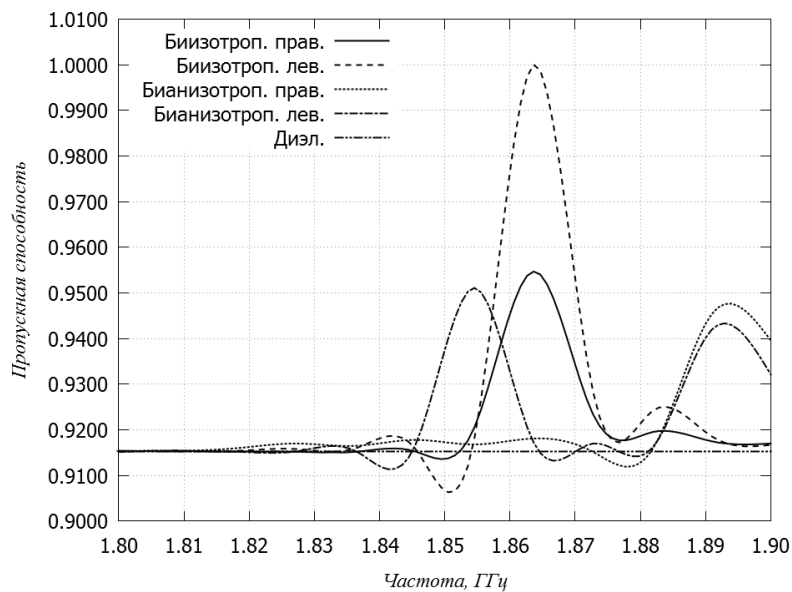


Рис. 7. Зависимость пропускной способности от частоты

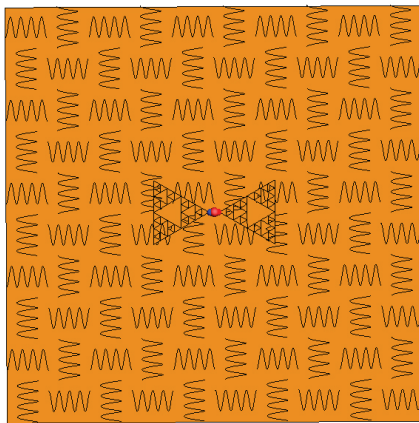


Рис. 8. Геометрия структуры

анизотропного (все элементы направлены вертикально).

На рис. 7 показаны зависимости пропускной способности систем ММО от частоты для биизотропных и бианизотропных киральных подложек на основе лево- и правовинтовых спиралей. Кроме того, на графике также приведена зависимость пропускной способности для диэлектрической подложки. Из представленных гра-

фиков видно, что в целом пропускная способность систем ММО в случае антенной решетки с подложкой из кирального метаматериала в целом выше, чем с диэлектрической подложкой. В свою очередь, пропускная способность в случае использования киральных подложек на основе левовинтовых спиралей выше, чем на основе правовинтовых. Кроме того, в случае бианизотропных структур на основе левовинтовых спиралей имеет место еще один эффект повышения пропускной способности на более высоких частотах.

Таким образом, использование киральных метаматериалов в системах ММО также является весьма перспективным.

Наконец, следует отметить, что антенные системы на основе метаматериалов не свободны также и от недостатков [21], к основным из которых относят высокие потери и узкая рабочая полоса частот, где проявляются «уникальные» эффекты метаматериала. В настоящее время существует несколько подходов к расширению

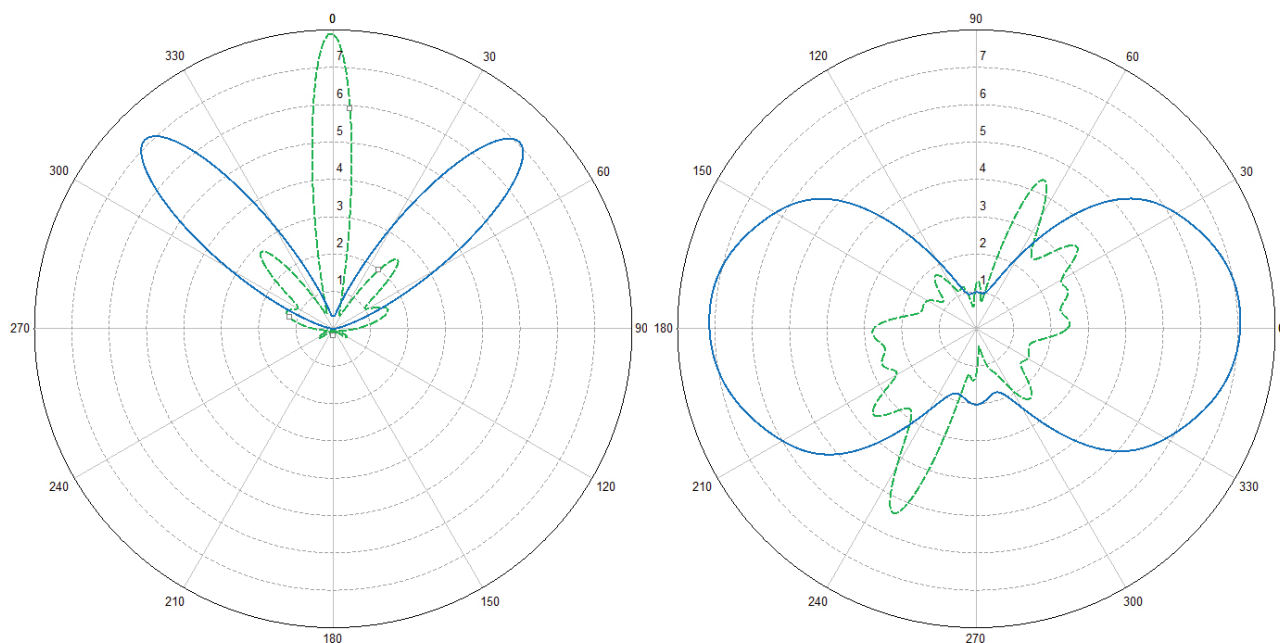


Рис. 9. ДН антенн с фрактальными излучателями, расположенными на диэлектрической (сплошная линия) и киральной (штриховая линия) подложках, в вертикальной (слева) и азимутальной (справа) плоскостях

рабочей полосы частот, одним из которых может служить подход, связанный с применением многослойных киральных подложек, каждой слой из которых «настроен» на определенную частоту [22]. Очевидно, что при достаточно большом разnose резонансных частот (т. е. при сильном геометрическом различии киральных слоев), будет иметь место наличие нескольких резонансов и при определенных условиях в принципе возможно увеличение рабочей полосы. Однако при этом, неизбежны и без того большие джоулевские потери, что в свою очередь, может привести к крайне низкому коэффициенту полезного действия (КПД) антенны. Другой подход связан с использованием так называемых «управляемых» метаматериалов [23], представляющих собой диэлектрический контейнер с внедренными элементами, макроскопические параметры которого зависят от внешних электрических и магнитных полей (феррит, сегнетоэлектрик и т. п.). В результате приложения внешних полей возможна «настройка» метаматериала на работу в любом диапазоне.

Для дальнейшего улучшения электрических и массо-габаритных характеристик антенн, предлагается еще один подход, связанный с использованием фрактальных излучателей в антеннах на основе киральных метаматериалов. На рис. 8 приведена электродинамическая модель такой антенны, где в качестве излучателя используется многодиапазонный диполь Серпинского, расположенный на подложке из кирального ме-

таматериала на основе правовинтовых спиралей.

В результате исследования было установлено, что при использовании киральной подложки такая антенна обладает лучшими направленными характеристиками, в частности имеет один узкий лепесток на частоте 3.5 ГГц, о чем свидетельствуют диаграммы направленности (ДН), представленные на рис. 9. В это же время у антенн с прямоугольным излучателем, расположенным на киральной подложке, и у антенн с излучателем в виде диполя Серпинского, расположенным на диэлектрической подложке, имеет место расщепление ДН.

Необходимо также отметить, что также как и в случае антенны с прямоугольным излучателем, расположенным на киральной подложке, при использовании фрактального излучателя имеет место наличие возможностей излучения электромагнитных волн эллиптической поляризации.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что предложенный подход, связанный с использованием фрактальных излучателей в антеннах на основе киральных метаматериалов, в целом позволяет улучшить их электрические характеристики и является также перспективным.

Таким образом, рассматриваемый подход, связанный с использованием метаматериалов, к дальнейшему совершенствованию характеристик СВЧ-устройств, антенной техники и систем радиосвязи в целом, является весьма перспек-

тивными и в обозримом будущем возможен переход на антенны и устройства нового поколения на основе метаматериалов.

Список литературы

1. Перспективы использования метаматериалов в антеннах нового поколения / А.Л. Бузов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20. № 3. С. 15–20.
2. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3–28.
3. Неганов В.А., Осипов О.В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
4. Нещерет А.М. Применение сингулярных интегральных уравнений для анализа микрополосковых антенн, расположенных на киральной структуре из левовинтовых спиралей // Радиотехника. 2016. № 4. С. 118–126.
5. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media / I.V. Lindell [et al.]. London: Artech House, 1994. 291 p.
6. Будагян И.Ф., Ковальчук А.А., Чебышев В.А. Микрополосковая спиральная антенна в многослойной среде на основе диэлектрических и метаматериалов в режиме излучения наносекундных импульсов // Т-Comm. 2012. № 10. С. 30–33.
7. Распределение тока в гиротропной микрополосковой структуре при ее возбуждении плоской волной / М.А. Бузова [и др.] // Доклады академии наук. 2018. № 5. Т. 480. С. 533–536.
8. Решение электродинамической задачи для микрополосковой излучающей структуры с киральной подложкой / М.А. Бузова [и др.] // Письма в ЖТФ. 2018. № 11. Т. 44. С. 80–86.
9. Интегральное представление электромагнитного поля геометрически киральной структуры / В.А. Капитонов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 4. С. 6–13.
10. An spatial-domain method of moments analysis of a cylindrical-rectangular chirostrip / L.-W. Li [et al.] // Progress in Electromagnetics Research. 2002. PIER 35. P. 165–182.
11. Анализ мик-рополосковой антенны на киральной подложке с учетом пространственной дисперсии / Д.С. Ключев [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 67–72.
12. Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index / R. Zhao [et al.] // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. № 3. P. 035105-1–4.
13. Zhao R., Koschny T., Soukoulis C.M. Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate // Optics Express. 2010. Vol. 18. № 14. P. 14553–14567.
14. Полевой С.Ю. Экспериментальное определение материальных параметров киральных сред в миллиметровом диапазоне длин волн // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 4(18). № 4. С. 27–33.
15. Осипов О.В., Волобуев А.Н. К вопросу о физическом смысле материальных уравнений киральной среды // Письма в журн. техн. физики. 2009. Т. 35. Вып. 16. С. 28–33.
16. Ziolkowski R.W., Erentok A. Metamaterial-based efficient electrically small antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54. № 7. P. 2113–2130.
17. Ключев Д.С., Коршунов С.А., Нещерет А.М. Поляризационные характеристики микрополосковых излучающих структур на основе метаматериалов // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-17». Т. 2. Казань: Изд. КГТУ, 2017. С. 162–166.
18. Исследование характеристик антенных систем на основе метаматериалов в целях обеспечения электромагнитной совместимости средств радиосвязи / В.В. Бадалов [и др.] // Антенны. 2017. № 11. С. 31–38.
19. Возможности повышения пропускной способности в системах ММО путем использования антенн на основе метаматериалов / А.Н. Беспалов [и др.] // Радиотехника. 2018. № 4. С. 87–91.
20. Паршин Ю.Н., Комиссаров А.В. Пропускная способность ММО телекоммуникационной системы в условиях изменяющейся пространственной структуры радиотракта с искусственной многолучевостью // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 1. С. 50–55.
21. Митра Р. Критический взгляд на метаматериалы // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 9. С. 1051–1058.
22. Матричные методы расчета характеристик многослойных планарных метаматериалов при наличии киральности и пространственной дисперсии / Д.С. Ключев [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2017. Т. 15. № 3. С. 217–226.
23. Magnetically tunable Mie resonance-based dielectric metamaterials / K. Bi [et al.] // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. P. 7001.

Possibilities of improvement of the antenna technology through the use of chiral metamaterials

A.L. Buzov, D.S. Klyuev, A.M. Neshcheret

The review of the existing researches to the analysis and synthesis of antennas on the basis of metamaterials, and also a number of new researches of authors on possibilities of application of chiral metamaterials in antenna equipment and networks of radio communication is given. The prospects of using metamaterials in antenna systems of radio communication networks in order to improve their electrical and mass-dimensional characteristics are substantiated.

Keywords: metamaterial, chiral media, antennas, improvement of antenna characteristics.