

2 W. Roh et al., “Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, 2014, pp. 106–13.

3 T. S. Rappaport et al., “38 GHz and 60 GHz Angle-Dependent Propagation for Cellular and Peer-to Peer Wireless Communications,” 2012 IEEE ICC, 2012, pp. 4568–73.

4 J. N. Murdock et al., “A 38 GHz Cellular Outage Study for an Urban Outdoor Campus Environment,” 2012 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf., 2012, pp. 3085–90.

5 T. Tsukizawa et al., “A Fully Integrated 60 GHz CMOS Transceiver Chipset Based on WiGig/IEEE802. 11ad with Built-In Self Calibration for Mobile Applications,” 2013 IEEE Int'l. Solid- State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, 2013, pp. 230–231.

6 E. Cohen et al., “A Thirty-Two-Element Phased-Array Transceiver at 60 GHz with RF-IF Conversion Block in 90 nm Flip chip CMOS Process,” 2010 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp., IEEE, 2010, pp. 457–60.

7 A. Valdes-Garcia et al., “Single-Element and Phased-Array Transceiver Chipsets for 60-GHz Gb/s Communications,” IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 4, 2011, pp. 120–31. [9] Y. P. Zhang and D. Liu, “Antenna-on-Chip and Antennain- Package Solutions to Highly Integrated Millimeter-Wave Devices for Wireless Communications,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 57, no. 10, 2009, pp. 2830–41.

УДК 537.86 + 621.396.67

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Г.И. Леонович¹, Д.С. Клюев², К.Е. Воронов³, А.М. Телегин³

¹Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва;

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара;

³«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Ключевые слова: метаматериалы, беспроводные технологии, радиочастотный диапазон, направления научных исследований.

В настоящее время наблюдается непрерывное совершенствование беспроводных технологий, применяемых в классической радиосвязи, в стационарных и мобильных телекоммуникационных и сенсорных сетях, в радиолокации, радиотелеметрии, радиофотонике и др. Благодаря последним достижениям в области материаловедения, связанным с метаматериалами, сформировался ряд новых научных направлений в различных сферах человеческой деятельности. Метаматериалы (ММ) — композиты, получаемые искусственной модификацией внедряемых в базовую структуру элементов, что дает возможность менять размеры,

формы и периоды решеток атомов, а также иные параметры материала. ММ обладают аномальными параметрами магнитной и диэлектрической проницаемости, а также ряда других физических показателей, определяемых законом Снелла, приобретают за счет этого уникальные оптические, радиофизические, электрические и иные свойства, которых нет у материалов природного происхождения [1].

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что к числу актуальных тем научных исследований, ориентированных на методы и технологии создания и применения ММ в беспроводных устройствах и системах радиоволнового диапазона, относится манипулирование электромагнитным спектром излучения и отражения.

Цели исследований [1-6]:

- увеличение мощности излучения, чувствительности и дальности действия связных, командных, радиотелеметрических и радиолокационных станций, а также автономных сенсорных модулей дистанционного и контактного принципов действия;

- снижение заметности и искажение параметров наблюдаемых активных устройств и отражающих поверхностей в различных поддиапазонах электромагнитного излучения;

- уменьшение массогабаритных показателей антенно-фидерных устройств и аппаратуры в целом;

- совмещение функций радиотехнических, механических, акустических, оптических и других систем в одном устройстве или агрегате;

- преобразование и накопление энергии радиоволн;

- освоение терагерцового диапазона для расширения функциональных возможностей перспективных РТС и др.

В качестве иллюстративного примера перспективы применения ММ в беспроводных технологиях можно привести достижения и направления научных исследований в области антенно-фидерных устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов [9, 10].

Среди ММ, которые можно применить в таких устройствах, выделяют киральные (гиротропные) среды, представляющие собой диэлектрический контейнер, в котором равномерно распределены проводящие включения зеркально-ассиметричной формы (спирали, S-элементы, Ω -частицы, разомкнутые кольца и др.) Данные среды обладают рядом физических свойств, благодаря которым они представляют интерес при создании компактных энергоэффективных антенн СВЧ и КВЧ диапазонов. Двумя основными типами киральных ММ являются биизотропные ММ, в которых зеркально асимметричные элементы ориентируются произвольным образом, и бианизотропные ММ, в которых элементы ориентированы

одинаково. Кроме того, левосторонние и правосторонние элементы также обладают различными электродинамическими эффектами.

Направление исследований антенн с применением киральных ММ успешно развивается за рубежом в интересах радиотехнических устройств и систем. В частности, имеются сведения об изделиях фирм Rayspan и Netgear (США), использующих полосковые антенны диапазонов 2,4 ГГц и 5,2 ГГц на основе ММ. Исследованиями таких ММ активно занимаются ученые университетов, входящих в систему MURI (междисциплинарных университетских исследований): США (Калифорнийский и Массачусетский университеты) и Великобритании (Имперский колледж). Исследования финансируются Управлением военно-морских исследований и Агентством перспективных оборонных исследований. В России в области ММ для АФС известны исследования, проводящиеся в ИПФ РАН, МФТИ, МИСиС, Поволжском ГУТИ, ИТМО (С/Петербург), Воронежском ГТУ, Казанском НИТУ, ЮФУ, Нижегородском ГТУ и др.

На рис. 1а приведен макетный образец биинизотропного кирального ММ на основе правовинтовых спиралей, на рис. 1б – структура антенной решетки, в которой этот материал применен в качестве подложки.

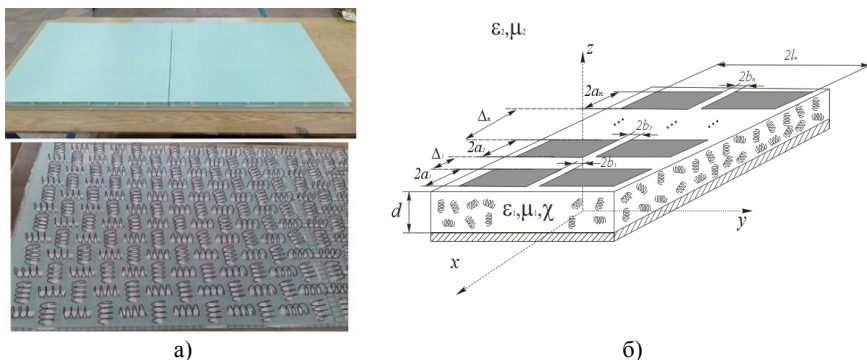


Рисунок 1 – Биинизотропный киральный ММ на основе правовинтовых спиралей

На современном этапе, как следует из открытых источников, использование ММ в антеннах и антенной технике позволяет:

- уменьшить массогабаритные показатели антенн до 20%;
- совместить функции защитного укрытия и пассивного рассеивателя с заданными электрическими характеристиками;
- уменьшить уровень обратного излучения направленных антенн до 10 дБ;
- увеличить коэффициент направленного действия (КНД) до 20 дБи;
- формировать требуемые характеристики направленности при существенно уменьшенном количестве активных излучателей;

- формировать входные (импедансные) характеристики, включая реализацию широкополосных и многочастотных (многополосных) антенн с использованием фрактальной геометрии излучателей;
- увеличить развязку между излучателями при работе в составе фазированной антенной решетки до 30 дБ.

При создании радиотехнических устройств и систем с использованием ММ важным этапом является проведение электродинамического моделирования. Ввиду сложности реализуемых решений применяемые алгоритмы и методы анализа должны обладать высокой вычислительной эффективностью и корректностью. Достигнутые к сегодняшнему дню результаты экспериментальных и теоретических исследований относятся, в основном, к радиопоглощающим поверхностям и СВЧ-КВЧ устройствам, использующим композиты с отрицательными ϵ и μ . Сохраняет актуальность фундаментальная научно-техническая проблема разработки адекватных и точных математических моделей ММ и устройств на их основе, корректных методов их электродинамического моделирования, позволяющих получать расчёт характеристик с высокой точностью и устойчивостью, а также практических рекомендаций по их изготовлению.

Список использованных источников

1. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. – <http://www.fulviofrisono.com/attachments/article/404/theory%20and%20phenomena%20in%20metamaterials.pdf>.
2. Ferran M. Metamaterials for wireless communications, radiofrequency identification, and sensors. – <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/780232/>.
3. Effects of electromagnetic metamaterials on radio energy transmission systems. – <https://www.eurekalert.org/news-releases/944872>
4. J. Jung, H. Park, J. Park, et al., “Broadband metamaterials and metasurfaces: a review from the perspectives of materials and devices,” *Nanophotonics*, vol. 9, pp. 3165–3196, 2020, <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0111>.
5. Harvesting energy from the air: metasurface-based antenna turns ambient radio waves into electric power/ <https://scitechdaily.com/harvesting-energy-from-the-air-metasurface-based-antenna-turns-ambient-radio-waves-into-electric-power/>.
6. T. T. Kim, H. Kim, M. Kenney, et al., “Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated-graphene metasurfaces,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 6, p. 1700507, 2018, <https://doi.org/10.1002/adom.201700507>.
7. Леонович Г.И., Данилин А.И., Куприянов С.В., Воронов К.Е., Телегин А.М., Захаров В.Н. Низкочастотные радиоантенны и антенные системы на основе внутриволоконных брэгговских решеток, сопряженных с магнитоэлектрическими структурами /В сборнике: Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2020. С. 9-11.

8. Леонович Г.И., Данилин А.И. и др. Перспективные направления развития беспроводных сенсорных сетей /В сборнике: Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 8-11.

9. Buzov A.L., Buzova M.A., Minkin M.A., Klyuev D.S., Neshcheret A.M. Calculation of characteristics of planar antenna arrays with substrates made of chiral metamaterials taking into account the dispersion of macroscopic parameters/ В сборнике: 15th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2021. 15. 2021. С. 9411393.

10. Ключев Д.С., Нещерет А.М., Соколова П.Ю. Характеристики излучения полосковых излучающих структур с киральными подложками /В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей восьмой Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 2021. С. 203-208.

УДК 621.3

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОФОТОННЫХ МЕТОДОВ ОПРОСА ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ВБР

И.Л. Борисенков¹, К.Е. Воронов², Г.И. Леонович¹, А.М. Телегин²,
М.П. Калаев²

¹Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва;

²«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева», г. Самара

Ключевые слова: ВБР, оптоволоконный датчик, интеррогатор.

Датчики на основе внутриволоконных брэгговских решеток (ВБР) в силу высокой надежности, долговечности, компактности, простоты изготовления и эксплуатации, возможности применения различных способов и средств увеличения чувствительности и динамического диапазона широко применяются в квазираспределенных и точечных системах измерения деформации, температуры, давления, ускорения, магнитного, электрического и акустического полей, а также ряда других физических и химических величин. Существующие алгоритмы опроса массива ВБР-датчиков в целом можно разделить на два типа: мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM) и мультиплексирование с разделением по времени (TDM) [1]. Для WDM максимальное количество ВБР ограничено отношением ширины спектра источника к динамическому диапазону длин волн отдельного ВБР-датчика