

# Исследование дифракции электромагнитных волн на структурах из кирального метаматериала различных частотных диапазонов

М. А. Бузова

АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем»  
bma@siprs.ru

*Аннотация.* В данной работе были выполнены синтез и исследования свойств электродинамически подобных структур из кирального метаматериала с резонансными частотами 600 МГц и 900 МГц. С практической точки зрения такие структуры, рассчитанные, в частности, на частоту 900 МГц, могут быть использованы для уменьшения влияния антенн сотовой радиосвязи на остальные антенны, присутствующие на радиотехническом объекте.

Выполнены электродинамическое моделирование и исследование явления дифракции на электродинамически подобных структурах из кирального метаматериала на основе спиральных элементов при их возбуждении плоскими волнами соответствующего диапазона или полуволновыми вибраторами. Получены следующие эффекты: – полученные резонансные частоты структур из метаматериала при различных способах возбуждения несколько отличаются друг от друга; – абсолютные значения максимумов наведенных токов при возбуждении плоскими волнами для различных резонансных частот несколько отличаются друг от друга; – частотные зависимости максимума тока, соответствующие возбуждениям вибраторами, имеют менее осцилляционный характер. Наблюдаемые эффекты связаны, по-видимому, во-первых, с хаотичным характером распределения киральных элементов, а, во-вторых, с различным проявлением дифракционных эффектов на краях структур при падении различных электромагнитных волн.

*Ключевые слова:* структуры из кирального метаматериала; резонансные частоты; спиральные элементы; полуволновые вибраторы; дифракция

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема уменьшения взаимного влияния между взаимодействующими антеннами в тех случаях, когда это необходимо, не теряет своей актуальности и в настоящее время. В связи с этим различные новые идеи и технологии, предлагаемые для увеличения развязки между взаимодействующими антеннами, в настоящее время весьма востребованы и пользуются большим интересом. Одной из таких технологий является использование искусственных композитных структур (метаматериалов) [1–4]. Исследованиям применения структур из метаматериалов для уменьшения взаимного влияния между антеннами и отдельными элементами антенных систем посвящено значительное количество работ, в частности [5–10]. В них предлагаются различные структуры из метаматериала на основе разъемных кольцевых резонаторов, фракталов, управляемых варакторов и проч.

В данной работе в качестве структур из метаматериала рассматривались совокупности киральных элементов, а именно – спиралей, равномерно распределенных в диэлектрической контейнере (например, в воздухе) и ориентированных хаотично. Такой тип кирального элемента был выбран из соображений достижения максимального взаимодействия с электромагнитными волнами, излучаемых вибраторами. При этом в случае использования других типов киральных элементов, таких, как S-элементы,  $\Omega$ -частицы, гаммаионы, так называемый «эффект киральности» оказался бы меньше [11]. При этом хорошо известно, что структуры из кирального метаматериала обладают ярко выраженными собственными резонансными распределениями наведенных на них токов, и появляющиеся эффекты от киральных структур будут максимальными вблизи соответствующих резонансных частот [1–4, 12].

В предыдущих работах автора большое внимание было уделено исследованиям структур из кирального метаматериала на основе спиральных элементов с резонансной частотой 656 МГц и его применению для увеличения развязки между антеннами различных типов, расположенными в ограниченных условиях пространства [13–16]. В данной же работе автором были выполнены синтез и исследования свойств электродинамически подобных структур и с другими резонансными частотами, а именно 600 МГц и 900 МГц. С практической точки зрения структура из метаматериала, рассчитанный, в частности, на частоту 900 МГц, может быть использована для уменьшения влияния антенн сотовой радиосвязи на остальные антенны, присутствующие на объекте.

Казалось бы, при простом электродинамическом подобию свойства структур из метаматериала должны строго повторяться. Однако, рассматриваемые структуры из метаматериала с подобным хаотическому распределением спиралей представляют собой сложную высокочастотную частотно-избирательную структуру, в которой распределение тока на спиральных элементах сильно варьируется в зависимости от множества параметров [1–4,12]. Поэтому так важно исследовать структуры из метаматериала различных частотных диапазонов.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вообще задача синтеза структуры с заранее заданной резонансной частотой является непростой задачей. Первым этапом такого синтеза структур из метаматериала является выбор подходящего типа

кирального элемента и расчет их геометрических размеров на заданную резонансную частоту с помощью формулы Томсона в квазистатическом приближении [12, 17]. Затем выбирается оптимальное расположение киральных элементов и их концентрация.

Далее, для более точного определения собственной резонансной частоты структуры выполняется электродинамическое моделирование полученной структуры. Наиболее распространенным подходом к уточнению резонансной частоты структуры является постановка и решение задачи дифракции плоской волны на структуре в широком диапазоне частот. При этом выполняются расчеты частотных зависимостей максимального тока, наведенного на структуре, а также рассеянного поля. Резонансная частота определяется на основе полученных зависимостей как частота, на которой амплитуда токов, наведенных на структуре, имеет максимальное значение.

В настоящей работе первый этап построения опустим, воспользовавшись ранее полученными результатами, и сразу перейдем ко второму этапу. Итак, в качестве объекта для проводимых исследований рассмотрим две структуры из метаматериала на основе левосторонних спиральных элементов, рассчитанных на разные резонансные частоты. Чертеж спирального элемента, из которого состоят структуры, представлен на рис. 1а, а чертеж самих структур – на рис 1б.

Первая предварительно синтезированная рассматриваемая структура рассчитана на резонансную частоту 600 МГц и имеет следующие характерные размеры: высота спирали  $h = 0,045$  м, диаметр спирали  $D = 0,022$  м, межвитковое расстояние  $\delta = 0,011$  м, количество витков спирали – 4. Структура состоит из 576 элементов, размер ее стороны  $a = 1,08$  м, расстояние между центрами спиралей составляет  $0,045$  м. Резонансная частота каждого спирального элемента согласно формуле Томсона составляет 600 МГц. Вторая рассматриваемая структура рассчитана на резонансную частоту 900 МГц и имеет характерные размеры, в 1,5 раза меньшие, чем первая, что вполне очевидно с физической точки зрения.

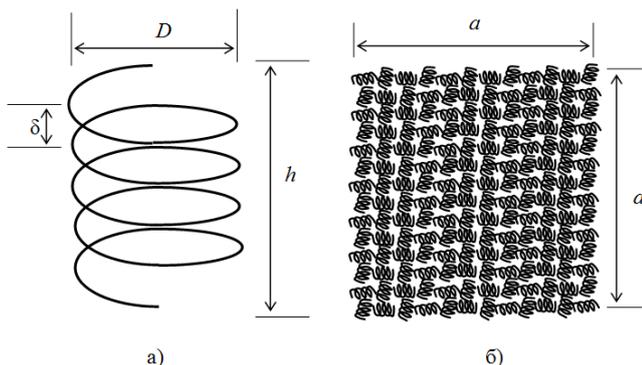


Рис. 1. Схематическое изображение спирального элемента и структуры из метаматериала на его основе

В рамках второго этапа синтеза для моделирования рассматриваемых структур была построена математическая модель на основе интегрального уравнения Поклингтона в тонко-проволочном приближении [18, 19]. С помощью данной модели были рассчитаны распределения линейных токов, наводимых на структурах при нормальном падении на них плоской

волны в широком диапазоне частот. Причем для каждой частоты падающей волны фиксировалось максимальное значение амплитуды тока, наведенного на всех спиральных структурах.

Схематично постановка рассматриваемой задачи показана на рис. 2а, где показан случай падения на структуру из метаматериала плоской волны.

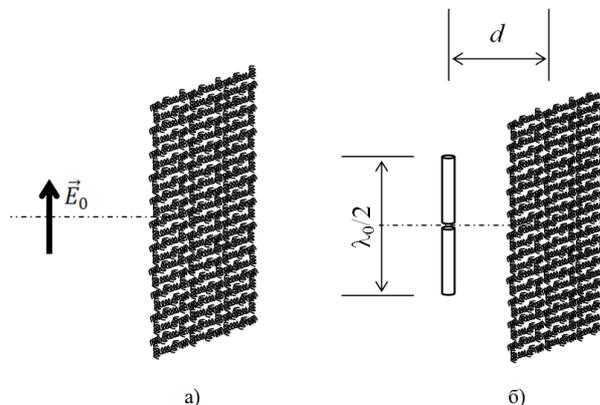


Рис. 2. Постановка задачи

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены некоторые из полученных результатов. На рис. 3 представлена частотная зависимость максимума наведенного тока при нормальном падении плоской волны, поляризованной параллельно плоскости структуры, на структуру с резонансной частотой 600 МГц (сплошная кривая). Из графика хорошо видно, что максимум данной частотной зависимости соответствует частоте 600 МГц. Это подтверждает тот факт, что собственной резонансной частотой данной структуры является именно эта частота.

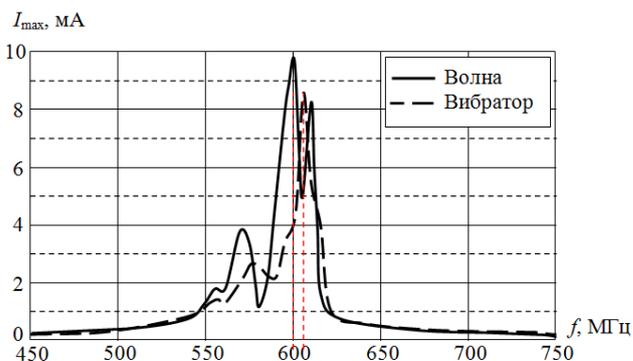


Рис. 3. Частотные зависимости максимума тока, наведенного на структуру с резонансной частотой 600 МГц

На рис. 4 представлена аналогичная частотная зависимость максимума наведенного тока при нормальном падении плоской волны, поляризованной параллельно плоскости структуры, на структуру с резонансной частотой 900 МГц (сплошная кривая). Из графика также хорошо видно, что максимум данной частотной зависимости соответствует частоте 900 МГц.

Для большей полноты исследований были также рассчитаны сечения рассеяния на рассматриваемых структурах для резонансных частот. Соответствующие результаты исследований представлены на рис. 5. Сплошная кривая на графике соответствует частоте 600 МГц, штрих-пунктирная – частоте 900 МГц. Из

представленного рисунка хорошо видно, что полученные сечения рассеяния практически совпадают между собой.

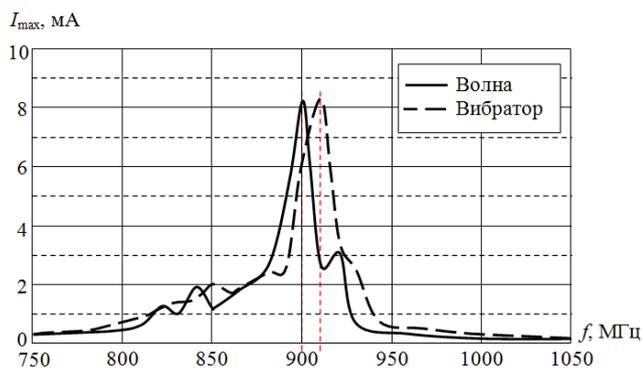


Рис. 4. Частотные зависимости максимума тока, наведенного на структуре с резонансной частотой 900 МГц

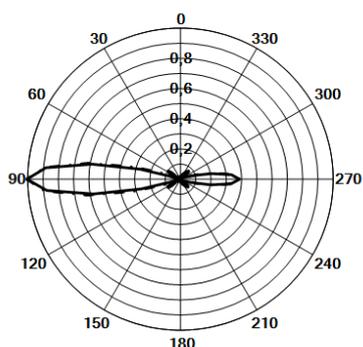


Рис. 5. Сечения рассеяния структур из кирального метаматериала

Однако, как показали ранее проведенные исследования, распределения наведенных на структурах токов и, соответственно, характеристики направленности системы, могут зависеть от характеристик падающего поля. Это необходимо учитывать при синтезе структур из метаматериала для решения задачи увеличения развязки между антеннами в составе заранее заданного сложного антенного комплекса. Поэтому при указанной постановке задачи автором предлагается дополнительно уточнить собственную резонансную частоту требуемой структуры из метаматериала путем ее возбуждения известной антенной, для уменьшения влияния которой она синтезируется.

В предыдущих работах автора было определено, что оптимальным расстоянием между мешающей антенной, влияние которой необходимо минимизировать, и структурой из метаматериала является  $d = 0,65 \lambda_0$  (где  $\lambda_0$  – рабочая длина волны мешающей антенны). В данной работе в качестве мешающих антенн рассмотрим соответственно синтезированным выше структурам симметричные полуволновые вибраторы с рабочими частотами 600 МГц и 900 МГц. Расположим антенны на определенном ранее расстоянии так, чтобы центры симметрии структуры и вибратора совпадали, и будем возбуждать их также в достаточно широком диапазоне частот и определять наведенные на структурах максимумы токов аналогично описанному выше. Случай возбуждения структуры полуволновым вибратором, расположенным по оси симметрии структуры параллельно ее плоскости на расстоянии  $d$ , схематично

показан на рис. 2б. Полученные графики показаны на рис. 3 и 4 штриховыми линиями, соответственно.

Из сравнения сплошных и штриховых кривых на рис. 3 и 4, а также самих рис. 3 и 4 можно сделать следующие выводы:

1) При возбуждении структур вибраторами частоты, на которых наблюдаются максимумы наведенных на структурах токов, получились равными, соответственно, 605 МГц и 910 МГц.

2) Полученные резонансные частоты при различном возбуждении несколько отличаются друг от друга (на 0,8 % для частоты 600 МГц и на 1,1 % для частоты 900 МГц). Это связано с различным распределением наводимых на структуре токов от различных источников возбуждения, что является вполне очевидным с физической точки зрения.

3) Частотные зависимости максимума тока, соответствующие возбуждениям вибраторами, имеют менее осцилляционный характер, что связано, по-видимому, с меньшим проявлением дифракционных эффектов на границах структур.

4) Абсолютные значения максимумов наведенных токов при возбуждении плоскими волнами несколько отличаются друг от друга, что связано, по-видимому, с хаотичным распределением киральных элементов.

Также для рассматриваемых вибраторов на выше определенных резонансных частотах структур были рассчитаны диаграммы направленности (ДН) в Е- и Н-плоскостях. Соответствующие результаты представлены на рис. 6. Левый рисунок (а) соответствует Е-плоскости, правый (б) – Н-плоскости. Сплошные кривые на графиках соответствуют частоте 600 МГц, штрих-пунктирные – частоте 900 МГц.

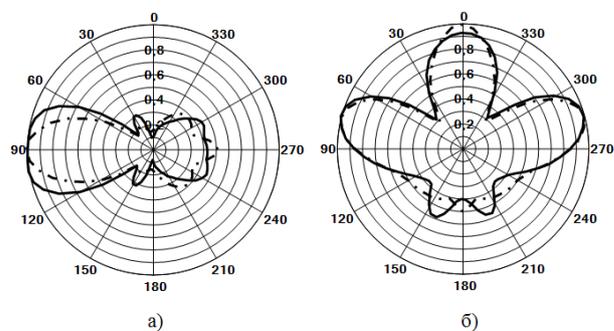


Рис. 6. Диаграммы направленности вибраторов в Е- и Н-плоскостях

Из представленных данных хорошо видно, что ДН рассматриваемых систем хорошо совпадают между собой, что соответствует общефизическим принципам.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что, во-первых, из-за сложного близкого к хаотичному расположению киральных элементов принцип электродинамического подобия в его классическом понимании для рассматриваемых структур из метаматериала не выполняется, а, во-вторых, при синтезе структур из метаматериала для улучшения развязки между заранее известными антеннами желательно дополнительно определять резонансную

частоту структуры при конкретном ее положении между взаимодействующими антеннами и возбуждении мешающей антенной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. *Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media*. London: Artech House, 1994.
- [2] Cui T.J., Smith D.R., Liu R. *Metamaterials: theory, design, and applications*. New York: Springer, 2009.
- [3] Tarricone L., Esposito A. *Advances in information technologies for electromagnetics*. New York: Springer, 2006.
- [4] Engheta N., Ziolkowski R.W. *Metamaterials: physics and engineering explorations*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [5] Tang M.-C., Xiao S., Wang B., Guan J., Deng T. Improved performance of a microstrip phased array using broad band and ultra-low-loss metamaterial slabs, *IEEE Ant. and Prop. Mag.*, 2011, vol. 53, no 6, pp. 31–41.
- [6] Pan B.C., Tang W.X., Qi M.Q., Ma H.F., Tao Z., Cui T.J. Reduction of the spatially mutual coupling between dual-polarized patch antennas using coupled metamaterial slabs, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6.
- [7] Mohamed I.S., Abdalla M.A., Safavi-Naeini S. A wide band metasurface enhancement of mutual coupling in SatCom / 5G antenna applications, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2019, pp. 39–40.
- [8] Alibakhshikenari M., Virdee B.S., See C.H., Abd-Alhameed R.A., Ali A.H., Falcone F., Limiti E. Study on isolation improvement between closely-packed patch antenna arrays based on fractal metamaterial electromagnetic bandgap structures, *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2018, no 12 (14), pp. 2241–2247.
- [9] Zhang L., Song Z., Ye L., Liu Y., Liu Q.H. Experimental investigation on high efficiency decoupling using tunable metamaterials, *International Symposium on Antennas and Propagation*, 2015, pp. 1–4.
- [10] Trindade D. von B.M., Müller C., Castro M.C.F. De, Castro F.C.C. De. Metamaterials applied to ESPAR antenna for mutual coupling reduction, *IEEE Ant. and Wirel. Prop. Lett.*, 2015, vol. 14, pp. 430–433.
- [11] Lakhtakia A., Varadan V.K., Varadan V.V. *Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media*. Lecture notes in physics. Berlin, Heidelberg, Boston: Springer-Verlag, 1989.
- [12] Buzov A., Buzova M., Minkin M., Klyuev D., Neshcheret A. Calculation of characteristics of planar antenna arrays with substrates made of chiral metamaterials taking into account the dispersion of macroscopic parameters, in *Proc. 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (Dusseldorf, Germany, 22–26 March 2021)*, pp. 1–5.
- [13] Buzov A., Buzova M., Minkin M., Neshcheret A. Study of properties of metamaterial screen for isolation increase between antennas, in *Proc. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, 2021*, vol. S17 *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials – II*, pp. 1–2.
- [14] Buzov A.L., Buzova M.A. Reducing mutual coupling between directional and non-directional antennas by using metamaterial screens, in *Proc. 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI) (Denver, CO, USA, 10–15 July 2022)*, pp. 1788–1789.
- [15] Buzov A.L., Buzova M.A. Influence of antenna systems with metamaterial screens composition and geometric parameters on mutual coupling between antennas, in *Proc. 2022 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) (Cape Town, South Africa, 5–9 September 2022)*, p. 3.
- [16] Buzova M.A. Influence of the size and location of the metamaterial screens on the isolation between emitters, in *Proc. 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC) (Moscow, Russia, 23–25 November 2022)*, pp. 278–280.
- [17] Buzov A.L., Buzova M.A., Klyuev D.S., Neshcheret A.M., Sokolova Yu.V. Mathematical model of conformal radiating structures with chiral filling based on spiral elements taking into account the macroscopic parameters frequency dispersion, *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023, vol. 44, no 9, pp. 4009–4015.
- [18] Bladel J. *Electromagnetic Fields*. IEEE Antennas and Propagation Society, 2007.
- [19] Davidson D.B. *Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering*. Cambridge University Press, 2005.