

УДК 621.396.67 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.33.38

Исследование эффективности применения киральных метаматериалов в конструкциях антенн радиотехнических систем космических аппаратов

С. Б. Филиппов, к. т. н., *fsb-progress@yandex.ru*

АО «Ракетно-космический центр “Прогресс”», Самара, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы применения искусственных композитных материалов в конструкциях антенн радиотехнических систем космических аппаратов. Приведены формулы для расчета параметров киральности метаматериалов и электродинамические модели подложек. Показана эффективность использования кирального заполнения в конструкции двухзаходной конической логоспиральной антенны, позволяющего снизить массогабаритные характеристики. Выполнена задача по математическому моделированию, и приведены результаты расчета электрических характеристик двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением в программном комплексе FEKO. Приведена оценка перспективности использования данных антенн для радиотехнических систем космических аппаратов.

Ключевые слова: метаматериалы, киральные среды, поляризация, электродинамическая модель, диаграмма направленности, резонансные свойства

Effectiveness Research of Chiral Metamaterials in the Structures of Antennas of Spacecraft Radio Engineering Systems

S. B. Philippov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *fsb-progress@yandex.ru*

ISC “Rocket and Space Center “Progress”, Samara, Russian Federation

Abstract. The article considers the prospects of using artificial composite materials in antenna design of radio engineering systems of spacecraft. The formulas are given to calculate chirality parameters of metamaterials and electrodynamic models of substrates are presented. The efficiency of using chiral filling in the design of the two-wire conical log-spiral antenna, which allows reducing weight and size characteristics, is shown. The task of mathematical simulation was completed and the calculation results of electrical characteristics, two-wire conical log-spiral antenna with chiral filling are presented in the FEKO software complex. The assessment of the prospects of employing these antennas for radio engineering systems of spacecraft is given.

Keywords: metamaterials, chiral media, polarization, electrodynamic model, directional diagram, resonant properties

Введение

Одной из важных задач, решаемых современной радиоэлектроникой при разработке радиотехнических систем космических аппаратов (РТС КА), является развитие теории и техники антенн. Как правило, разработка антенн, которые обеспечивали бы необходимые электродинамические характеристики, начинается с расчетов по классическим инженерным формулам, согласно которым такие антенны рассматриваются в различных приближениях, основанных на физике происходящих в антенне процессов [1, 2]. Однако использование антенн, устанавливаемых на КА, определенных частотных диапазонов (в частности, метрового диапазона) встречает затруднения, связанные с различными ограничениями, такими как размеры и конфигурации самого аппарата, зоны полезного груза, компоновка научной и целевой аппаратуры, невозможность применения раскрывающихся устройств и т. д.

В 1967 г. В. Г. Веселаго [3] рассмотрел киральные отрицательные среды и предложил интересные варианты использования этих материалов, связанные с аномальным преломлением. Создание подобного материала, например, для антенн диапазонов ОВЧ или УВЧ, в силу известного принципа электродинамического подобия потребует реализации структур с аналогичными электрическими размерами элементов, которые будут иметь существенно большие, абсолютные (геометрические) размеры включений [4]. Тем не менее электрические размеры включений остаются весьма малыми и, как показывают результаты исследований, применение метаматериалов в антенной технике позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели, а также добиться более высокой направленности антенн [5–7]. С другой стороны, метаматериалы также не свободны и от недостатков [8]. Наиболее важными факторами, ограничивающими возможности метаматериалов, являются высокие потери, узкая полоса частот, а также анизотропное поведение. Однако в настоящее время активно проводятся исследования так называемых «управляемых» метаматериалов [9], представляющих собой слой из диэлектрического материала с внедренными элементами, материальные параметры которого зависят от внешних электрических и магнитных полей (феррит, сегнетоэлектрик и т. п.).

Использование данных «управляемых» метаматериалов в конструкции антенн позволит управлять ее характеристиками при помощи внешних электрических и магнитных полей. Поэтому дальнейшее совершенствование конструкций антенн на основе метаматериалов является перспективным, о чем свидетельствует активность публикаций в журналах и материалах конференций за последнее годы.

В данной статье представлены результаты построения математической модели и анализ характеристик двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением для повышения эффективности функционирования РТС КА. Разработка таких математических моделей позволит создавать принципиально новые конструкции антенн, отличающиеся по своим габаритам и оптимальным диаграммам направленности в определенном частотном диапазоне.

Киральные среды и их структура

Среди метаматериалов следует выделить киральные среды, представляющие собой диэлектрический контейнер, в котором равномерно распределены проводящие включения зеркально-ассиметричной формы. В качестве таких включений могут выступать спирали, S -элементы, Ω -частицы, разомкнутые кольца и др. Данные среды обладают рядом уникальных свойств, основными из которых являются кросс-поляризация падающего поля, благодаря которому в среде происходит бифуркация нормальных волн на волны с лево- и правокруговыми поляризациями. Двумя основными типами киральных сред являются биизотропные (изотропные киральные) материалы, в которых зеркально-асимметричные элементы ориентируются произвольным образом, тем самым обеспечивая изотропию среды для волн с право- и левокруговыми поляризациями, и бианизотропные (анизотропные киральные) среды, в которых элементы ориентированы одинаково, создавая оси анизотропии [10, 12]. На рис. 1 приведена электродинамическая модель подложки из биизотропного материала (все элементы — спирали, ориентированы хаотично), а на рис. 2 — электродинамическая модель подложки из бианизотропного материала (все элементы — спирали, направлены вертикально).

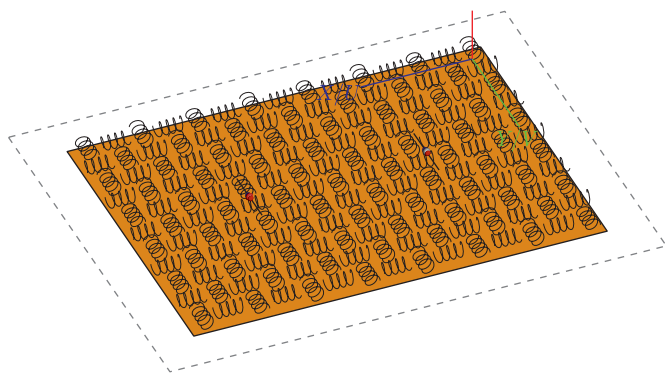


Рис. 1. Электродинамическая модель подложки из биизотропного материала

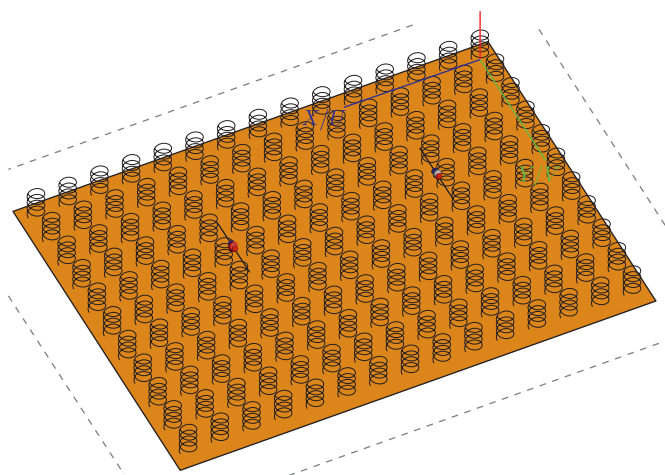


Рис. 2. Электродинамическая модель подложки из бианизотропного материала

В качестве однородного диэлектрического контейнера, в котором определенным образом размещаются описанные проводящие включения, обычно используется материал с небольшой диэлектрической проницаемостью, например пенополистирол.

Для определения дисперсии макроскопических параметров киральной структуры используется модель Максвелла Гарнетта. Выражения для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости и параметра киральности приведены ниже [11]:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_c + \frac{\beta_0^2}{4\pi^2(f_0^2 - f^2)}, \quad (1)$$

$$\chi(f) = A_0 \frac{\beta_0^2 f}{2\pi c(f_0^2 - f^2)}, \quad (2)$$

где ε_c — диэлектрическая проницаемость контейнера, в котором размещены проводящие включения зеркально-асимметричной формы;

β_0 — параметр, имеющий размерность частоты и связанный с внутренними процессами в киральной структуре;

A_0 — расстояние между соседними проводящими включениями;

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ — скорость света в вакууме;

f_0 — резонансная частота киральной структуры.

Резонансная частота макроскопических параметров кирального материала (метаматериала) в целом определяется резонансными свойствами проводящих включений, лежащих в основе данного метаматериала, в соответствии с формулой Томсона:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

где L — индуктивность киральных элементов;

C — емкость киральных элементов.

Перспективы развития конструкций антенн на основе киральных метаматериалов

Как отмечается в [12], «особое место в антенной технике занимают микрополосковые антенны (МПА), обладающие рядом несомненных достоинств: малые габариты, относительная простота и дешевизна изготовления и т. д. Обычно подложка у таких антенн изготавливается из высокочастотного диэлектрика, однако такой подход для дальнейшего улучшения массогабаритных и электрических характеристик практически исчерпал себя. В связи с этим предлагается в качестве подложки МПА, на которой расположен плоский излучатель, использовать киральный метаматериал на основе спиралей. Применение такой подложки позволит сместить резонансы по частоте, а также существенно снизить добротность, то есть сократить габариты, а также позволит расширить диаграмму направленности МПА и увеличить коэффициент заполнения».

Один из наиболее важных вопросов в теории киральных сред касается методов их электродинамического анализа и построения адекватных математических моделей. Под адекватностью будем понимать корректность качественного и количественного отображения математической моделью процессов, происходящих в метаматериале. Хорошая математическая модель может существенно сократить время и ресурсы, затрачиваемые на создание метаматериала с заданными свойствами.

Резонансные свойства киральных сред могут оказаться полезными с точки зрения формирования пространственных и импедансных характеристик антенн в нескольких относительно узких полосах частот, соответствующих частотам приема и передачи используемых РТС КА. Достаточно перспективным направлением в современных РТС КА представляется использование конструктивных решений двухзаходной конической логоспиральной антенны (ДКЛСА) с киральным заполнением (в данном случае супербиизотропным — правые спирали), модель которой представлена на рис. 3.

С помощью программы математического моделирования (ФЕКО) были рассчитаны импедансные и направленные характеристики данной антенны, в частности коэффициент отражения (рис. 4), а также диаграмма направленности и коэффициент усиления (рис. 5). Так же для сравнения была рассчитана диаграмма направленности (с аналогичными геометрическими размерами) двухзаходной конической логоспиральной антенны без кирального заполнения.

Заключение

На основании рассчитанных характеристик были сделаны следующие выводы:

- использование кирального заполнения улучшает согласование на рабочих частотах антенны, при этом позволяет снизить габариты антенны. В частности, рабочая частота снижается с 640 МГц до 510 МГц;
- использование кирального заполнения позволяет обеспечивать работу антенны еще как ми-

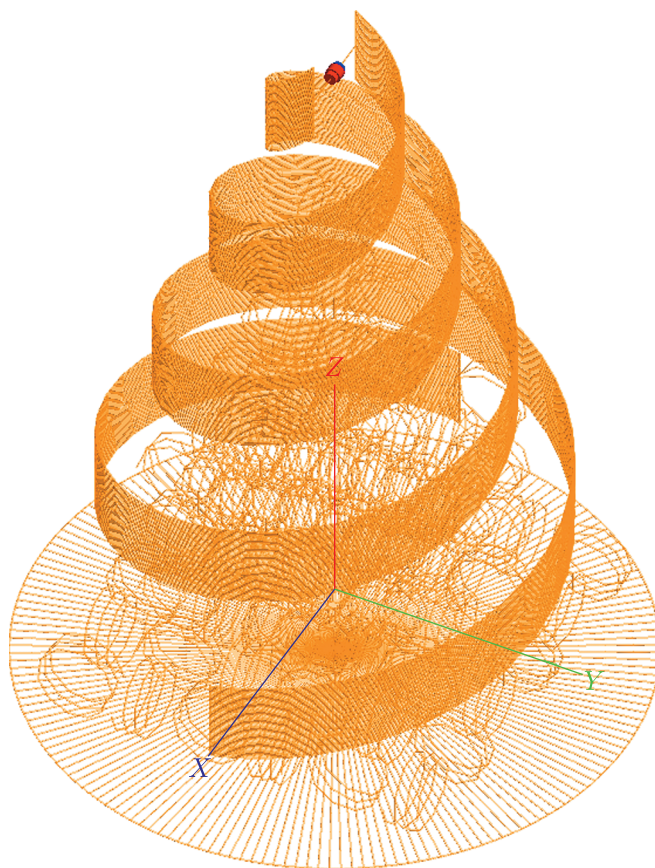


Рис. 3. Модель двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением

нимум на одной частоте. Кроме того, значительно расширяется рабочая полоса частот антенны;

- коэффициент усиления у антенны с киральным заполнением больше, чем у классической антенны, при этом ширина диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ уменьшается незначительно.

Применение антенн на основе метаматериалов возможно для бортовой аппаратуры автоматической идентификации судов (БА АИС). В настоящее время для данных систем устанавливаются антенны линейной вертикальной поляризации, обеспечивающие связь «судно–судно», «судно–маяк». В связи с установкой БА АИС на КА, возможно, потребуется разработка новых конструкций ДКЛСА УКВ-диапазона уменьшенных габаритов на основе киральных метаматериалов, способных обеспечить связь «судно–КА», «судно–судно», «судно–маяк» с одинаковой (круговой) поляризацией.

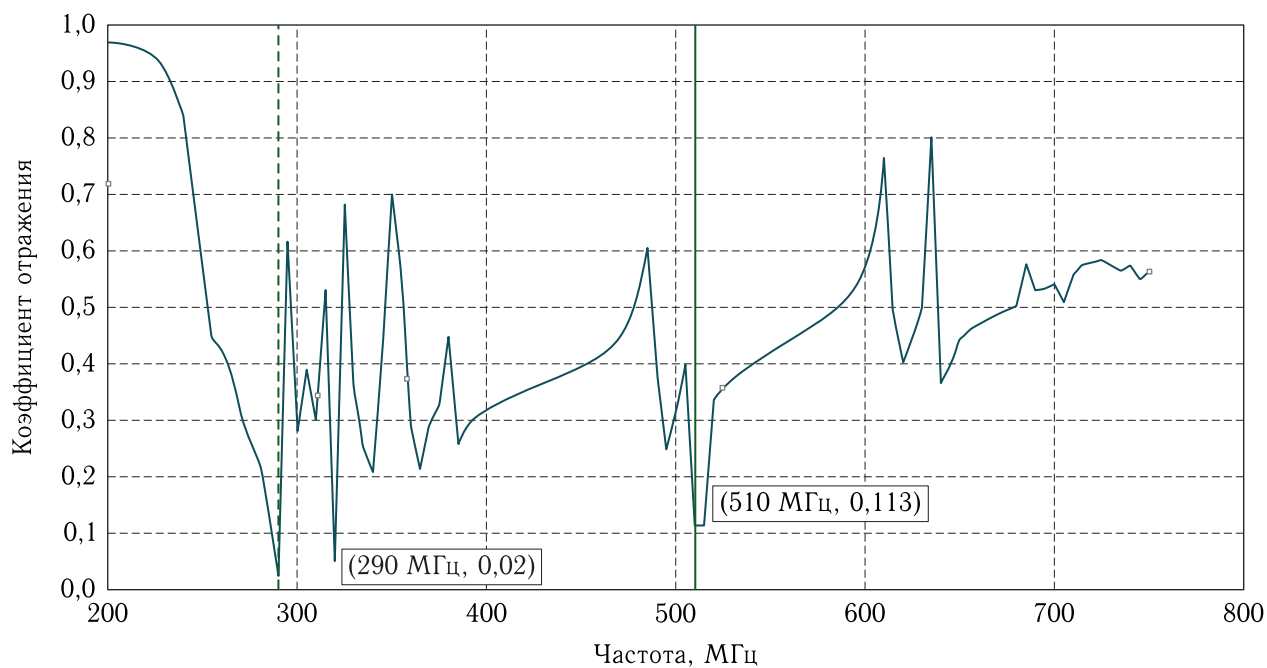


Рис. 4. Коэффициент отражения на фидер

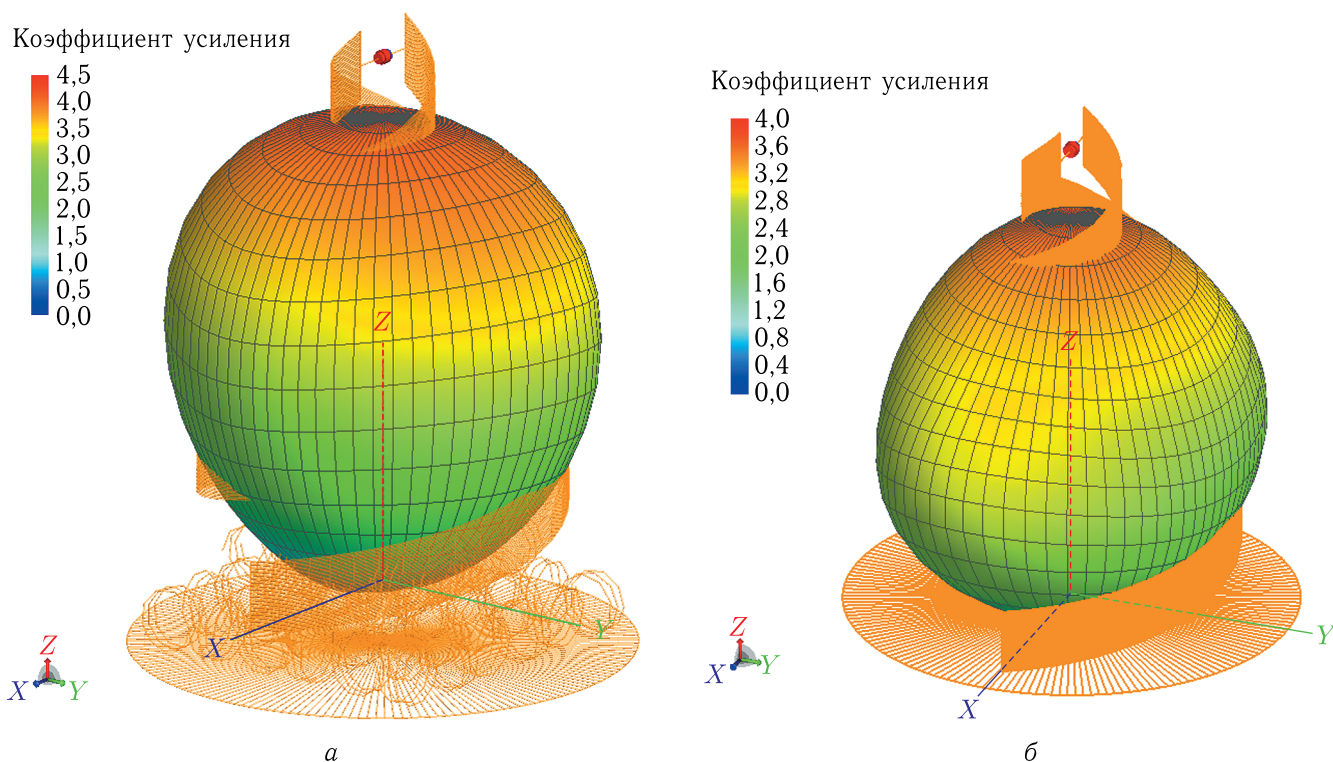


Рис. 5. а) Диаграмма направленности двухзаходной конической логоспиральной антенны с киральным заполнением на частоте 510 МГц; б) диаграмма направленности двухзаходной конической логоспиральной антенны без кирального заполнения на частоте 640 МГц

Список литературы

1. Сверхширополосные антенны: Сб. статей / Пер. с англ. С. В. Попова и В. А. Журавлева; под ред. Л. С. Бененсона. М.: МИР, 1964. 416 с.
2. Жук М. С., Молочков Ю. Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия, 1973. 460 с.
3. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // Успехи физических наук, 1967, т. 92, вып. 3. С. 517–526.
4. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля, 2010, № 3–4. С. 44–60.
5. Авдюшин А. С., Власов М. Ю., Пастернак Ю. Г. Применение метаматериалов в антенной технике // Вестник ВГТУ, 2013, т. 9, вып. 3–1. С. 132–135.
6. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: наука, технология, бизнес, 2009, № 7. С. 70–79.
7. Wang L., Wang L., Le-Wei Li J. A series-fed metamaterial microstrip antenna array of broadband and high-gain // 2012 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, 2012. P. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/iWEM.2012.6320361>.
8. Митра Р. Критический взгляд на метаматериалы // Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, № 9. С. 1051–1058.
9. Pozar D. Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, vol. 35, № 6. P. 613–621. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.1987.1144161>.
10. Bi K., Guo Y., Liu X. et al. Magnetically tunable Mie resonance-based dielectric metamaterials // Sci. Rep., 2014, vol. 4. P. 7001.
11. Неганов В. А., Осипов О. В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
12. Бузов А. Л., Ключев Д. С., Нещерет А. М., Неганов В. А. Перспективы использования метаматериалов в антеннах нового поколения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2017, т. 20, № 3–1. С. 15–20.