

УДК 621.396.67

**А.У. Касимова**

*Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, Бишкек,  
Кыргызстан*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ С ОБЪЕМНОЙ КИРАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКОЙ НА ОСНОВЕ МАССИВА СПИРАЛЕЙ**

В статье рассматривается влияние пространственно-неоднородной киральной среды на характеристики излучения и согласования двухдиапазонной микрополосковой антенны. Модификация подложки выполнена путем интеграции периодического массива  $6 \times 5$  металлических правовинтовых спиралей в объем диэлектрика. Представлены результаты численного моделирования в среде CST Studio Suite. Обнаружен дуальный характер влияния метаструктуры: в низкочастотном диапазоне (2,0 ГГц) зафиксирована стабилизация пространственного распределения поля и рост полной эффективности на 5,7 дБ, в то время как в высокочастотном диапазоне (3,56 ГГц) выявлен эффект пространственного расщепления луча и формирование зенитной запретной зоны.

**Ключевые слова:** микрополосковая антенна, киральный метаматериал, спиральные включения, диаграмма направленности, эффективность излучения, CST Studio Suite.

### **Введение**

Современный этап развития систем беспроводной связи (5G/6G, MIMO, спутниковая навигация) предъявляет жесткие требования к массогабаритным и частотным характеристикам антенно-фидерных устройств. Одним из наиболее перспективных направлений улучшения параметров микрополосковых (патч) антенн является использование искусственных анизотропных сред — метаматериалов — в качестве подложек. Как показано в фундаментальных теоретических исследованиях слоистых систем, использование метаматериалов в объеме или в виде слоев микрополосковой структуры кардинально меняет реактивную часть входного сопротивления, добротность и позволяет эффективно управлять электрическими размерами излучателя, а именно уменьшать их [1]. Особый научный интерес вызывают киральные среды — структуры, зеркальная симметрия которых нарушена за счет геометрической формы их элементов (например, спиралей). Проходя сквозь такую среду, электромагнитная волна испытывает на себе эффекты кросс-поляризационного взаимодействия, оптической активности и кругового дихроизма.

Большинство существующих работ сфокусировано на использовании киральных метаматериалов в качестве внешних экранов или суперстратов. В работах Ключева Д.С., Нещерета А.М. и Осипова О.В. заложены строгие математические основы анализа излучающих структур на киральных подложках [2]. Однако большинство этих исследований носят теоретический характер (с использованием аппарата сингулярных интегральных уравнений), в то время как в данной статье упор сделан на трехмерное численное моделирование объемного массива спиралей в среде CST Studio Suite [3]. Идея применения киральных метаструктур для систем связи нового поколения (включая MIMO) активно развивается в работах А.М. Нещерета [4].

### **Геометрия структуры и выбор топологии массива**

Анализируемая микрополосковая антенна построена на основе трехслойной структуры. Основание представлено проводящим заземляющим слоем (печатная медь с проводимостью  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м), который служит экраном для заднего полупространства. Диэлектрическая подложка (например, FR-4 с  $\epsilon = 4,3$  и  $\text{tg } \delta = 0,025$ ) фиксированной толщины  $h$  располагается над заземлением. Верхний слой — прямоугольный металлический патч, чьи линейные размеры (длина  $L$  и ширина  $W$ ) определяют низко- и высокочастотные резонансы соответственно. Питание антенны осуществляется через коаксиальный кабель или микрополосковую линию с применением согласующего выреза. В исходном состоянии антенна демонстрирует два резонансных пика на частотах 2,38 ГГц и 3,56 ГГц.

Исследования, проведенные группой под руководством Ф. Баятпура [5], продемонстрировали значительное влияние геометрических характеристик металлических спиралей на диэлектрические свойства композитных материалов. Полученные ими данные свидетельствуют о том, что плотное расположение проводящих спиралей может существенно модифицировать частотные отклики устройств, работающих в СВЧ-диапазоне. Это наблюдение подтверждает результаты данной работы, заключающиеся в высокочастотном смещении резонансов (+470 МГц и +90 МГц) при использовании киральной подложки.

Пространственное управление характеристиками ближней и дальней зон в объеме диэлектрической подложки достигается путем интеграции периодического массива правовинтовых металлических спиралей. Массив состоит из 30 элементов, организованных в конфигурацию 6×5. Спирали, ориентированные вдоль оси Z (перпендикулярно плоскости экрана), равномерно распределены под прямоугольным патчем. Матрица массива имеет 6 рядов вдоль длинной стороны патча (ось Y) и 5 рядов вдоль его узкой стороны (ось X). Выбор прямоугольной топологии массива 6×5 обоснован электродинамическими и вычислительными соображениями: прямоугольные антенны демонстрируют выраженную пространственную анизотропию (различное распределение токов в E- и H-плоскостях), а матрица 6×5 позволяет адаптировать геометрию метаматериала к пропорциям излучателя, обеспечивая симметричное взаимодействие поля с каждым краем патча. Шаг решетки (расстояние между осями спиралей) выбран так, чтобы выполнялось условие:

$$\Delta \leq \lambda_{\text{eff}} \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{eff}}$  — длина волны в диэлектрике.

Благодаря этому дискретные контуры спиралей образуют плотную, электродинамическую связанную систему. Волна, срывающаяся с краев верхнего металлического патча, не взаимодействует с отдельными спиралью, а воспринимает массив как сплошную однородную киральную среду.

Сложная трехмерная геометрия 30 спиралей требует прецизионной дискретизации. Локальное уплотнение координатной сетки позволило CST Studio Suite с высокой точностью просчитать микроволновые токи на каждом витке, исключив появление вычислительных погрешностей.

### **Теоретическая концепция киральной ЭЗЗ**

С физической точки зрения разработанная структура представляет собой киральную электромагнитную запрещенную зону. Согласно фундаментальной теории, электромагнитные запрещенные зоны представляют собой периодические расположения диэлектрических и металлических элементов, спроектированные таким образом, чтобы предотвратить распространение электромагнитных волн в определенных частотных диапазонах [6]. В конструкциях плоских антенн эти структуры призваны выполнять две важнейшие функции, которые и были экспериментально зафиксированы в данной модели. ЭЗЗ блокирует поверхностные волны, которые обычно распространяются внутри подложки, вызывая паразитный нагрев платы и искажение ДН. На частоте 2,0 ГГц плотная сетка массива спиралей работает как защитный щит, выталкивая энергию наружу. Это оптимизирует фазовый фронт и приводит к росту полной эффективности антенны на 5,71 дБ (в 3,7 раза). На частоте 3,56 ГГц спираль входит в собственный жесткий резонанс, и массив превращается в «киральное зеркало». Оно создает абсолютную запрещенную зону для волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости решетки (вдоль нормали). Электромагнитное поле физически не может пройти сквозь этот барьер и вынуждено огибать его, что приводит к расщеплению центрального луча и формированию характерной «вмятины» по центру диаграммы направленности.

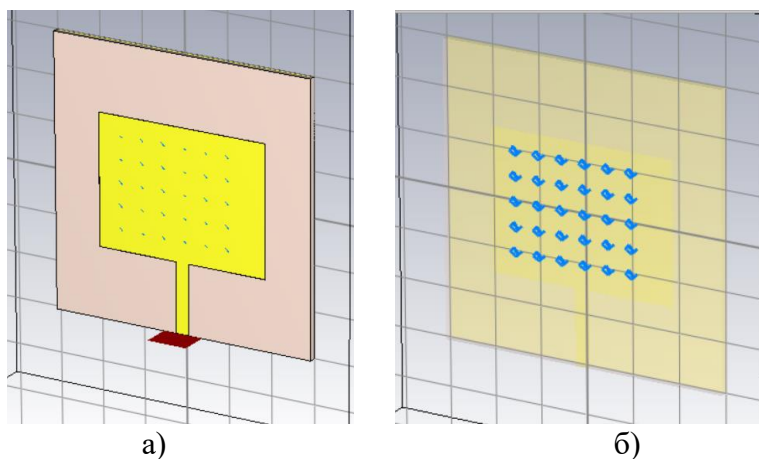


Рисунок 1 – Геометрия исследуемой микрополосковой структуры: а) общий вид излучателя; б) пространственное расположение элементов кирального метаматериала (массив 6×5 правовинтовых спиралей) в объеме подложки.

Внедрение массива спиралей кардинально изменило характер согласования антенны, что проиллюстрировано на сопоставительном графике коэффициента отражения  $S_{11}$ . Наблюдается явное смещение резонансных частот в высокочастотную область: первый пик сместился с 2,38 ГГц до 2,85 ГГц (+470 МГц); второй пик сместился с 3,56 ГГц до 3,65 ГГц (+90 МГц).

В классической электродинамике введение металла в диэлектрик увеличивает емкость среды, что должно снижать частоту. Однако в рассматриваемом киральном метаматериале, на заданных частотах, включения демонстрируют эффективную индуктивную реактивность. Это явление приводит к тому, что эффективная диэлектрическая проницаемость подложки принимает значения меньше единицы ( $\epsilon_{eff} < 1$ ). Следствием этого является уменьшение электрического размера подложки, что, в свою очередь, вызывает сдвиг резонансных частот в сторону более высоких значений.

Показатель  $S_{11}$  на обнаруженных резонансных частотах достиг значений -2,6 дБ при 2,85 ГГц и -3,8 дБ при 3,65 ГГц. Снижение глубины пиков показывает, что спирали перевели подложку в режим частотно-селективного пространственного фильтра, перераспределяющего баланс между излучаемой энергией и энергией, локализованной в ближней зоне структуры. На рисунках 2а и 2б показаны зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  от частоты для микрополосковой антенны. В случае базовой конструкции на стандартной диэлектрической основе наблюдаются ярко выраженные резонансные пики на частотах 2,38 ГГц и 3,56 ГГц. Для модифицированной версии, включающей интегрированный массив с киральным метаматериалом размером 6×5, фиксируется смещение высокочастотных максимумов в область 2,85 ГГц и 3,65 ГГц, что сопровождается изменением параметров согласования.

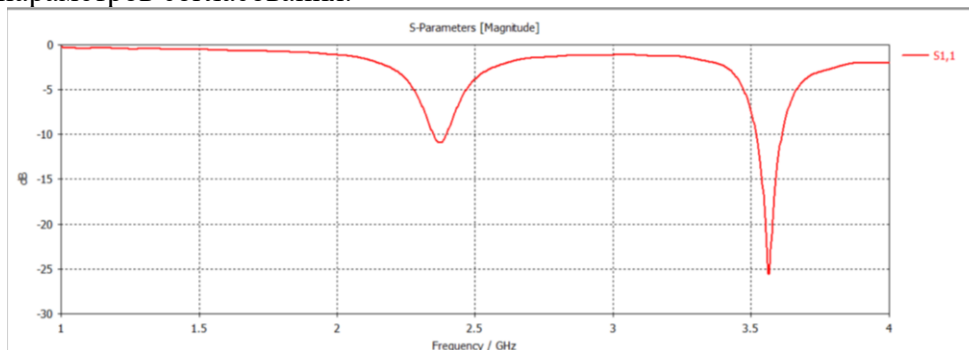


Рисунок 2а – Зависимость частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  стандартной микрополосковой антенны

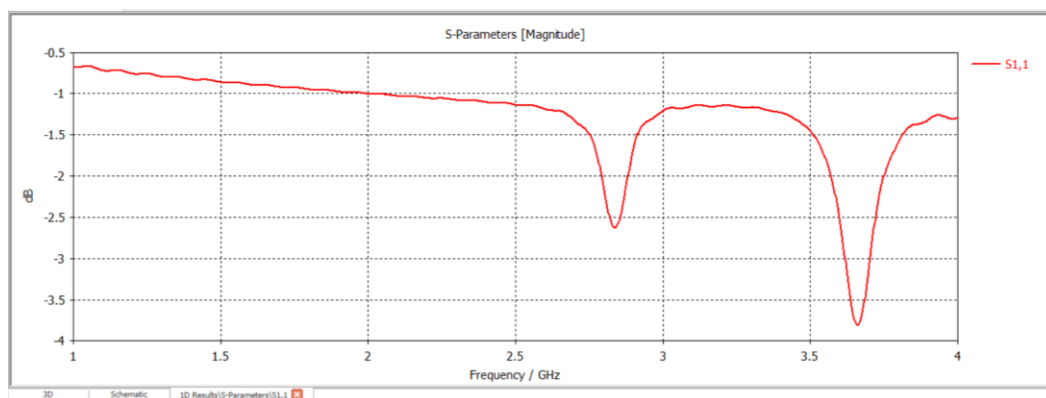


Рисунок 26 – Зависимость частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрополосковой антенны с массивом из киральных элементов

При проектировании микрополосковых антенн критической проблемой является возбуждение поверхностных волн, обусловленное конечностью размеров диэлектрической подложки. Как показано в [7], распространение этих волн приводит к дифракции на краях структуры, деформации диаграммы направленности и росту тепловых потерь. Традиционные методы борьбы с этим явлением требуют усложнения геометрии, в то время как объемная модификация подложки киральными элементами позволяет решить эту задачу изнутри. Для проверки данной идеи в программной среде CST Studio Suite был выполнен сравнительный анализ трехмерных диаграмм направленности (ДН) исходной структуры и антенны с метаподложкой, который выявил дуальный (частотно-зависимый) характер поведения системы. Для детального исследования изолирующих свойств киральной метаструктуры вне полосы основного согласования, анализ пространственного излучения был выполнен на частоте 2,0 ГГц. На данной частоте исследуемые структуры еще не достигают точек собственного резонанса, что позволяет в чистом виде зафиксировать влияние массива спиралей на подавление паразитных поверхностных волн в диэлектрике. Вне основного резонанса, на частоте 2,0 ГГц, исходная антенна без спиралей демонстрировала нестабильную, приплюснутую и заваленную в сторону ось излучения с низким уровнем эффективности (-13,39 дБ). Анализ трехмерных диаграмм направленности на данной частоте, показанный на рисунках 3а и 3б, наглядно иллюстрирует проявление первой фундаментальной функции ЭЗЗ-структур — подавление паразитных поверхностных волн.

В традиционных микрополосковых антеннах значительная часть электромагнитной энергии не излучается в свободное пространство, а распространяется внутри диэлектрической подложки в виде поверхностных мод, что приводит к росту тепловых потерь, искажению формы ДН и снижению КПД [8]. Интегрированный массив спиралей 6х5 на данной частоте блокирует распространение этих мод по подложке. В результате энергия перенаправляется в свободное пространство, что приводит к центрированию главного лепестка излучения вдоль нормали (ось +Z), и обуславливает резкий скачок полной эффективности структуры на 5,71 дБ (рост мощности излучения в 3,7 раза по сравнению с базовой моделью без спиралей). После интеграции массива спиралей зафиксированы следующие изменения: диаграмма выровнялась, приняв симметричную каплевидную форму, ориентированную строго вдоль нормали (ось +Z); полная эффективность возросла с -13,39 дБ до -7,68 дБ, что означает увеличение мощности излучения почти в 3,7 раза.

На этой частоте массив правовинтовых спиралей сработал как компенсирующая среда, которая минимизирует диэлектрические потери в текстолите и фокусирует поле вдоль оси максимума излучения.

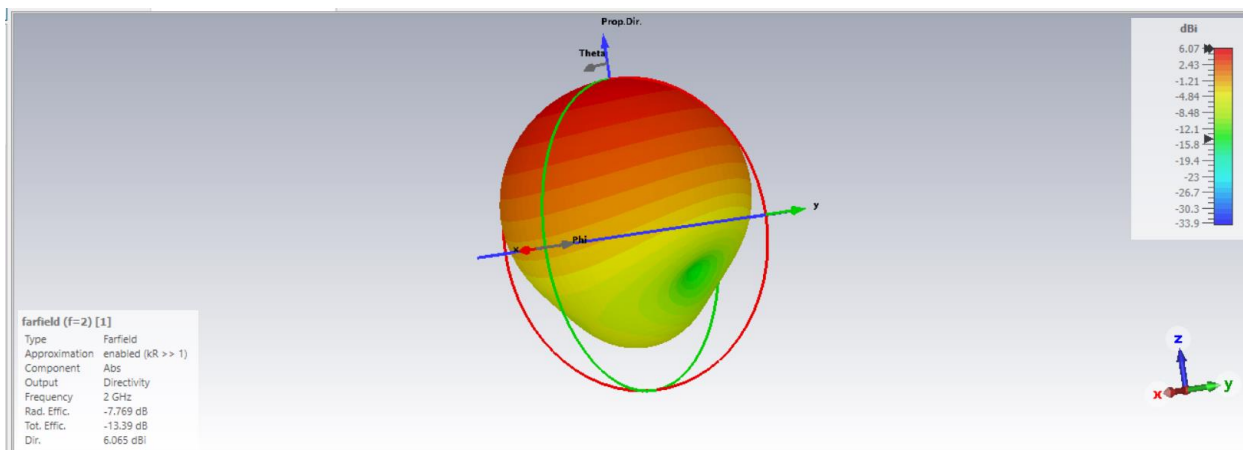


Рисунок 3а – Пространственные диаграммы направленности на частоте 2,0 ГГц: исходная антенна без включений (направленность 6,07 дБ, общая эффективность антенны -13,39 дБ);

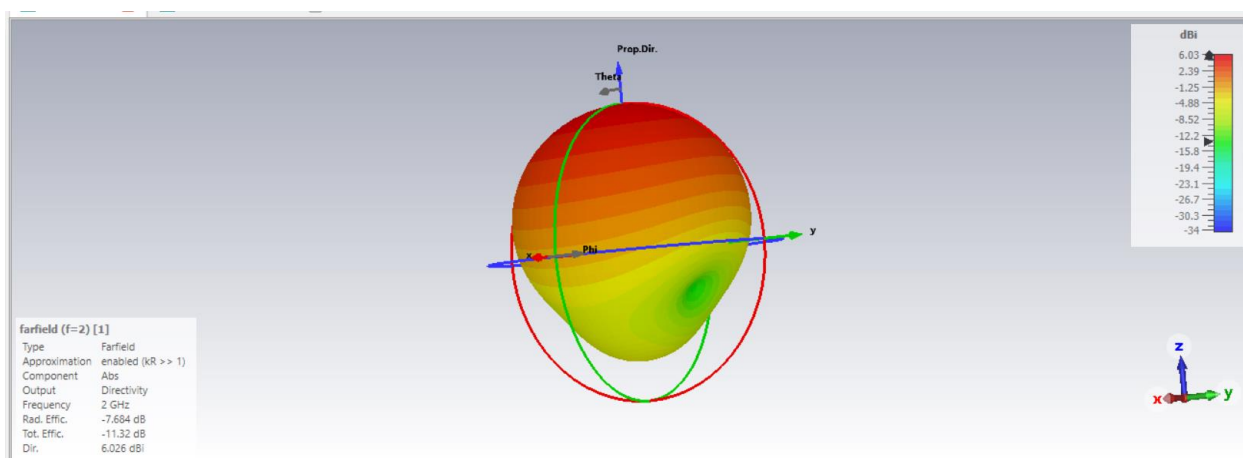


Рисунок 3б – Пространственные диаграммы направленности на частоте 2,0 ГГц: антенна с киральной подложкой (направленность 6,03 дБ, общая эффективность антенны -7,68 дБ).

На частоте исходного резонанса (3,56 ГГц) поведение метаматериала кардинально меняется. Без киральных включений антенна формирует классический узконаправленный луч в зенит с коэффициентом направленного действия 6,699 дБ. При включении киральных элементов по центру диаграммы направленности формируется глубокий провал. Коэффициент направленности падает до 5,479 дБ (ослабление на 1,22 дБ), а единый луч расщепляется на два широкоугольных боковых лепестка.

На частоте исходного резонанса патча (3,56 ГГц) активируется вторая базовая функция ЭЗЗ — предотвращение распространения волн в направлении, перпендикулярном плоскости решетки. На данной частоте геометрические параметры спиральных включений входят в режим жесткого пространственного резонанса с падающей волной. Метаструктура формирует локальную область запыриания поля, сквозь которую компонента излучения, идущая по нормали к подложке, физически не может распространяться.

Электромагнитная волна вынуждена огибать сформированную запрещенную зону, что приводит к пространственному перераспределению потоков мощности. Результатом данного процесса является глубокая деформация ДН с падением направленности по нормали на 1,22 дБ и расщеплением единого луча на два симметричных широкоугольных боковых лепестка.

Данная аномалия ДН строго доказывает формирование киральной запрещенной зоны. На частоте 3,56 ГГц геометрические параметры спиралей входят в пространственный резонанс с падающей волной. Спиральные структуры подавляют распространение

нормальной составляющей поля (в направлении Z), что приводит к отклонению потока энергии в боковые полупространства. В результате общая эффективность системы повышается на 4,56 дБ — с уровня -14,7 дБ до -10,14 дБ, что свидетельствует о переходе энергии, ранее рассеивавшейся в виде тепловых потерь в подложке, в режим направленного бокового излучения.

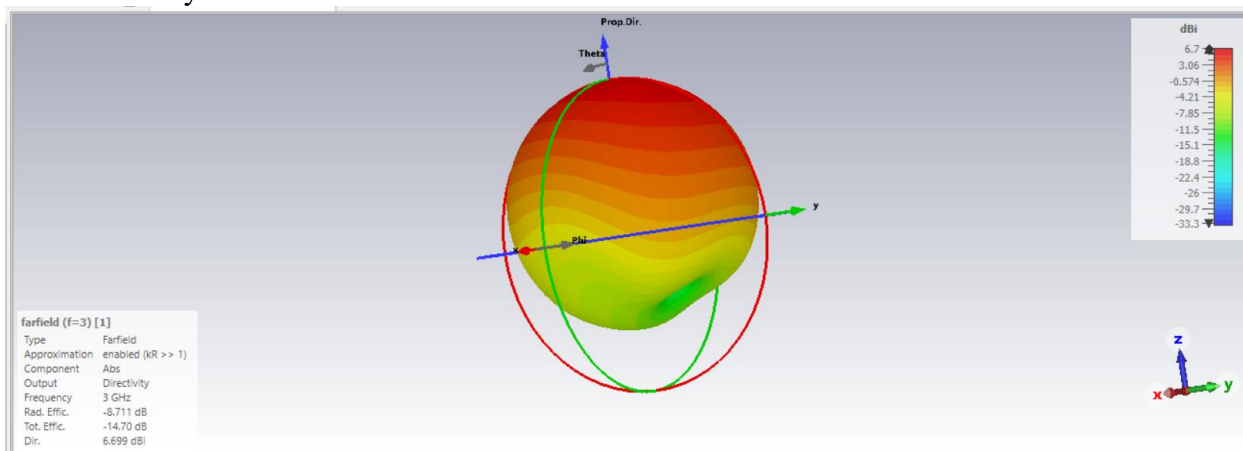


Рисунок 4а – Диаграмма направленности излучателя на частоте 3,56 ГГц: стандартная структура с максимумом излучения по нормали к плоскости подложки;

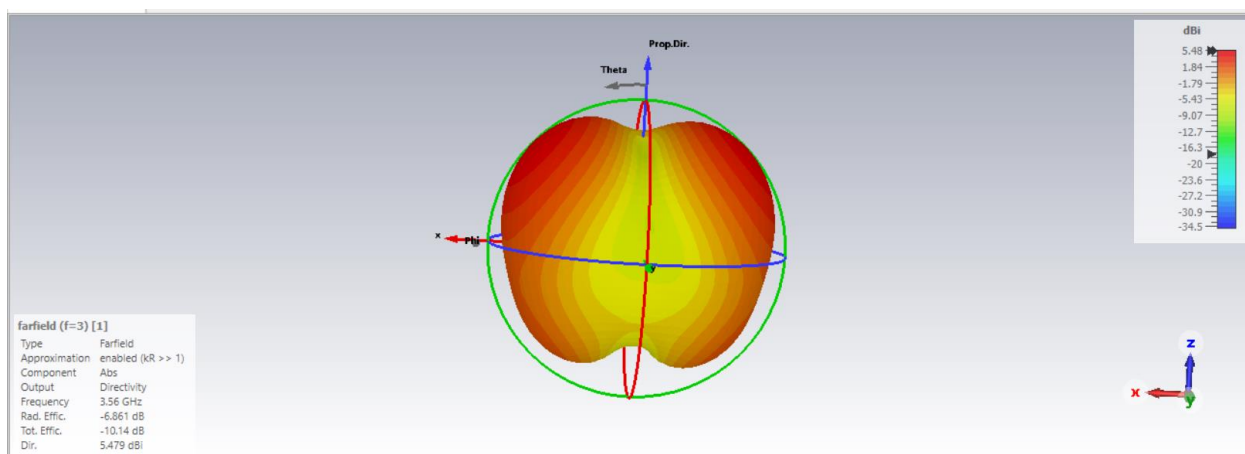


Рисунок 4б – Диаграммы направленности излучателя на частоте 3,56 ГГц: структура с киральным включением с расщеплением главного луча из-за формирования запрещенной зоны.

Исследования А.М. Нещерета активно продвигают концепцию использования киральных метаструктур в телекоммуникационных системах нового типа, в том числе с технологией ММО, подчеркивая их способность контролировать пространственную картину поля [4]. Наблюдаемый нами эффект пространственного разделения луча на частоте 3,56 ГГц позволяет развивать это направление, обеспечивая реализацию двухлучевого сканирования без необходимости применения фазовращателей.

Таблица 1. Сравнительные параметры исходной и модифицированной киральной антенны

| Физический параметр структуры       | Без спиралей (Исходная) | Со спиралью (Массив 6x5) | Изменение / Выявленный эффект    |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Резонансная частота $f_1$ , ГГц     | 2,38                    | 2.85                     | Высокочастотный сдвиг (+470 МГц) |
| Резонансная частота $f_2$ , ГГц     | 3,56                    | 3.65                     | Высокочастотный сдвиг (+90 МГц)  |
| Полная эффективность на 2,0 ГГц, дБ | -13,39                  | -7,68                    | Рост эффективности на +5,71 дБ   |

|                                               |           |              |                                        |
|-----------------------------------------------|-----------|--------------|----------------------------------------|
| Направленность (Directivity ) на 2,0 ГГц, дБ  | 6,065     | 6,026        | Стабилизация и центровка формы ДН      |
| Полная эффективность на 3,56 ГГц, дБ          | -14,70    | -10,14       | Рост на +4,56 дБ за счет переизлучения |
| Направленность (Directivity ) на 3,56 ГГц, дБ | 6,699     | 5,479        | Падение на -1,22 дБ (Провал в зените)  |
| Пространственная геометрия луча на 3,56 ГГц   | Одиночный | Расщепленный | Формирование двухлучевой ДН (MIMO)     |

Ключевым фактором, определяющим наблюдаемую дуальную зависимость структуры от частоты, являются прикладные задачи пассивной радиолокации и радиоэлектронной разведки. Для современных носителей, включая БПЛА, разведывательные воздушные суда и мобильные наземные комплексы перехвата, принципиально важно осуществлять непрерывный контроль смежных частотных диапазонов без применения механических приводов антенных систем [8]. Представленный эффект автоматической адаптации пространственной диаграммы направленности (ДН) при изменении рабочей частоты эффективно решает данную инженерную задачу. На нижней границе рабочего диапазона (приблизительно 2,0 ГГц) система генерирует сфокусированный зенитный луч, оптимизированный для селекции маломощных сигналов. При смещении рабочей частоты до 3,56 ГГц наблюдается расщепление ДН на двухлепестковую структуру, что приводит к существенному увеличению сектора обзора. Это открывает перспективные направления для применения подобных подложек при проектировании компактных многодиапазонных приемных систем, охватывающих L- и S-диапазоны.

#### **Заключение и перспективы дальнейших исследований**

Компьютерное моделирование в программной среде CST Studio Suite подтвердило возможность настройки пространственно-частотных параметров микрополосковой антенны за счет модификации структуры ее диэлектрической подложки. Созданная матрица из 30 правосторонних спиралей позволила реализовать два функциональных режима. В первом случае обеспечивается согласование на низких частотах и концентрация энергии, что повышает эффективность излучения в 3,7 раза. Во втором режиме, на высоких частотах, формируется симметричная двулучевая диаграмма направленности и создается экранирование, при этом внешние фазовращатели не применяются. Полученные данные открывают перспективы для разработки компактных многодиапазонных антенных комплексов (в частности, для бортовых РЛС или MIMO-систем), способных автоматически менять направление обзора при смене рабочей частоты.

Отдельного внимания заслуживает применение киральных метаподложек в антеннах систем радиотехнической разведки с апертурным синтезом (PTP/SIGINT). Рост полной эффективности на 5,71 дБ в низкочастотном диапазоне непосредственно транслируется в увеличение дальности обнаружения источников излучения: при прочих равных условиях энергетический выигрыш в 3,7 раза по мощности принятого сигнала позволяет существенно расширить рабочую дальность станции перехвата. Помимо этого, поляризационная чувствительность киральной среды к вращению плоскости поляризации (оптическая активность) может быть использована для идентификации типа источника по поляризационной сигнатуре сигнала, что является ценным признаком при классификации радиоэлектронных средств источников излучения в условиях плотной электромагнитной обстановки. Таким образом, результаты настоящей работы формируют научно-технический задел для разработки нового класса малогабаритных интеллектуальных антенных модулей двойного назначения, совмещающих функции широкополосного радиомониторинга и направленного приёма в единой конструкции.

Механическое изменение толщины диэлектрической подложки или шага намотки спиралей в реальных условиях эксплуатации бортовых радиотехнических систем представляется технологически неэффективным. В качестве альтернативного решения,

развивающего подходы, ранее предложенные автором в [3], в данной работе обоснована концепция перехода к активным метаподложкам. Использование сегнето- или пьезоэлектрических материалов в качестве матрицы композита позволяет реализовать электронное управление пространственными характеристиками излучателя. При подаче внешнего постоянного напряжения смещения за счет обратного пьезоэффекта происходит контролируемая микродеформация подложки. Это приводит к динамическому изменению геометрического шага массива спиральных включений и локальной трансформации тензора эффективной диэлектрической проницаемости среды. В результате обеспечивается эффект плавного, безынерционного сканирования пространства боковыми лучами без использования громоздких механических приводов и дискретных фазовращателей. Для наглядности электродинамические параметры обеих конфигураций сведены в единую таблицу сравнения.

В дальнейшем планируется проведение полноволнового параметрического анализа структуры, в которой диэлектрическая матрица FR-4 заменена на пьезоэлектрический монокристалл или сегнетокерамику. Будет построена точная зависимость угла отклонения боковых лучей от величины прикладываемого электрического напряжения, а также исследованы пути восстановления глубины согласования  $S_{11}$  ниже уровня -10 дБ на смещенных частотах.

Также следует изучить электромагнитные параметры подложки с шахматным расположением право- и левовинтовых спиралей, что теоретически обосновано в работах [9,10]. Переход от полностью правовинтовых массивов к смешанным структурам, теоретически описанный в фундаментальных трудах С.А. Третьякова [11] и развитый в современных исследованиях рацемических спиральных сред, позволяет сбалансировать поляризационные параметры подложки. Взаимная компенсация эффектов кросс-поляризации в таких системах открывает возможность минимизации эллиптических искажений поля при сохранении частотно-селективных заградительных свойств метаматериала.

#### **Литература:**

1. Чебышев В. В., Ястребцова О. И. Свойства микрополоскового вибратора в многослойной среде из метаматериалов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т. 9, № 7. — С. 47–52.
2. Ключев Д. С., Нецерет А. М., Осипов О. В. Метод расчета микрополоскового вибратора, расположенного на киральной подложке // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13, № 3. С. 245–252.
3. Касимова А. У. Интеграция киральных структур и метаматериалов в микрополосковых антеннах: обзор современных решений и перспектив // Проблемы автоматики и управления. 2025. № 2 (53). С. 88–99.
4. Нецерет А. Анализ микрополосковых антенн с подложками из киральных метаматериалов методом сингулярных интегральных уравнений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2018. - Т. 21. - №4. - С. 6-16.
5. Ф. Баятпур и К. Сарабанди, «Пространственный фильтр на основе метаматериалов для применения в фазированных антенных решетках», Международный симпозиум IEEE по антеннам и распространению радиоволн, Норт-Чарлстон, Южная Каролина, США, 2009, стр. 1-4, doi: 10.1109/APS.2009.5172274.
6. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media / I. V. Lindell, A. H. Sihvola, S. A. Tretyakov, A. J. Viitanen. Boston; London: Artech House, 1994. 332 p.

7. Ястребцова О. И., Чебышев В. В. Электродинамический анализ волн, распространяющихся в многослойных средах микрополосковых антенн // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т. 9, № 10. — С. 84–88.
8. Котков К.В., Минкин М.А. Антенны для размещения на беспилотных летательных аппаратах // Инфокоммуникационные технологии. - 2023. - Т. 21. - №1. - С. 36-44. doi: 10.18469/ikt.2023.21.1.05
9. Ключев, Д.С., Минкин, М., Мишин, Д.В. и др. Характеристики излучения микрополосковой антенны на подложке из хирального метаматериала. Radiophys Quantum El 61 , 445–455 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11141-018-9906-3>
10. Microstrip Patch Antenna Covered With Left Handed Metamaterial / E. Dogan, E. Unal, D. Karusuz [et al.]. – Текст : непосредственный // ACES Journal. – 2013. – Vol. 28, No. 10. – P. 999–1004.
11. Третьяков С. А. Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39. – №. 10. – С. 1457-1470.