

Исследование антенных комплексов с использованием киральных метаматериалов и фрактальной геометрии излучателей для систем ММО

А.Н. Беспалов¹, А.Л. Бузов², Д.С. Ключев¹ , А.М. Нещерет² 

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

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

Аннотация – Настоящая статья посвящена исследованиям возможностей повышения спектральной эффективности в системах ММО путем использования антенн с подложками из биизотропных и бианизотропных киральных метаматериалов и различными типами фрактальных излучателей, в частности, были использованы фрактальные структуры в виде треугольника Серпинского, кривых Коха и Гилберта, а также дипольной треугольной антенны сложной конфигурации – ФРМ. Расчет спектральной эффективности проводился путем использования одной из вариаций формулы Шеннона, в которую входит полная матрица Z-параметров. В свою очередь, данная матрица определялась с помощью программного комплекса электродинамического моделирования. Показано, что использование таких антенн с фрактальной геометрией излучателей, расположенных на киральных подложках, позволяет снизить взаимное влияние между излучателями и, в свою очередь, повысить спектральную эффективность в нескольких частотных диапазонах по сравнению с традиционными решениями.

Ключевые слова – фрактальная антенна, киральный метаматериал, ММО, спектральная эффективность.

Введение

В связи с наличием высококачественного мультимедийного контента, а также увеличения канальной емкости очевидно, что в настоящее время возрастают и требования к качеству обслуживания беспроводных сетей в целом, что, в свою очередь, приводит к их модернизации как программной, так и аппаратной части. Примером такого комплексного подхода является технология ММО (Massive MIMO) [1; 2], нашедшая широкое применение в современных беспроводных сетях, в т. ч. в сетях IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) и сетях 5G, которая позволяет обеспечить существенное повышение спектральной эффективности. Данная технология используется при многолучевом распространении сигналов, возникающем в том числе в условиях городской застройки.

В работах [3; 4] было показано, что увеличение спектральной эффективности с точки зрения модернизации аппаратной части позволяет обеспечить использование антенных комплексов, в конструкции которых применяются киральные метаматериалы [5; 6]. В общем случае метаматериалы – это искусственные композиционные материалы, представляющие собой совокупность двух и более материалов с кардинально разными элект-

рофизическими параметрами (например, диэлектрик с включенными в него особым образом металлическими вставками). Таким метаматериалам присущи электрофизические свойства, которые нехарактерны для природных материалов и которые обусловлены периодической структурой элементов определенной формы. Среди метаматериалов особый интерес вызывают исследования киральных метаматериалов, в которых проводящие включения зеркально-асимметричной формы равномерно распределены по диэлектрическому контейнеру.

Увеличение спектральной эффективности в системах ММО путем использования в таких антенных комплексах достигается за счет снижения взаимного влияния между излучателями путем создания высокоомных поверхностей с применением киральных метаматериалов [7; 8].

В современных сетях связи в ряде случаев могут возникать ситуации, когда нескольким радиопередатчикам приходится работать на одну антенну, причем в различных частотных диапазонах. Вместе с тем возникает потребность в многочастотных антеннах, способных функционировать в нескольких частотных диапазонах. Одним из типов таких многочастотных антенн являются антенны и антенные комплексы

с фрактальной (самоподобной) геометрией излучателя [9]. Кроме того, поскольку существует большое многообразие фрактальных геометрических структур, то такие антенны могут выполняться как часть предметов экстерьера, что снижает их заметность, а также может обеспечивать их размещение на объектах (зданиях), где искажение архитектурного облика недопустимо.

В связи с этим настоящая статья посвящена исследованию антенных комплексов с использованием киральных метаматериалов и фрактальной геометрии излучателей для систем ММО. Излучатели представляют собой фрактальные структуры в виде треугольника Серпинского, кривых Коха и Гилберта, а также дипольной треугольной антенны сложной конфигурации – ФРМ [10; 11], расположенных на подложках из киральных метаматериалов.

1. Методика оценки спектральной эффективности систем ММО

В работах [3; 4; 12] было показано, что достаточно сильное влияние на спектральную эффективность систем ММО оказывает взаимное влияние излучающих элементов антенной системы. Оценить спектральную эффективность системы ММО с учетом взаимного влияния излучателей антенной системы предлагается с помощью следующей формулы [12]:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{D_N} \mathbf{Z}_{\text{RX}}^{-1} \times \right. \\ \left. \times \mathbf{H} \mathbf{Z}_{\text{TX}} \mathbf{R} \mathbf{Z}_{\text{TX}}^H \mathbf{H}^H \left(\mathbf{Z}_{\text{RX}}^{-1} \right)^H \right), \quad (1)$$

где D_N – суммарная мощность шумов в каждой приемной антенне; \mathbf{Z}_{RX} , \mathbf{Z}_{TX} – матрица импедансов приемной и передающей антенных систем соответственно; \mathbf{H} – канальная матрица; \mathbf{H}^H – операция эрмитова сопряжения канальной матрицы; \mathbf{R} – корреляционная матрица входного сигнала.

Из данной формулы, которая, вообще говоря, является вариацией формулы К. Шеннона [13] на случай системы ММО, следует, что взаимное влияние излучателей описывается матрицами импедансов передающих и приемных антенных систем, образующих антенный комплекс. Общий вид матрицы импедансов антенной системы, имеющей n излучателей, записывается следующим образом:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{2n} & \dots & z_{nn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В (2) по диагонали матрицы стоят собственные импедансы каждого из входов антенной системы. Недиагональные элементы вычисляются как отношение напряжения, наведенного на пассивном входе излучателя антенной системы к току на активном входе излучателя антенной системы:

$$z_{ij} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_j}, \quad (3)$$

где \dot{U}_i – комплексная напряженность на пассивном излучателе; \dot{I}_j – комплексный ток на активном излучателе.

Для оценки спектральной эффективности системы ММО с учетом взаимного влияния между излучателями будем условно считать, что корреляция сигналов в парциальных каналах ММО отсутствует, а в источнике и приемнике установлены одинаковые антенные системы. В связи с этим формула (1) записывается как:

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

где q – уровень сигнала; N_{TX} – количество парциальных каналов.

Следует отметить, что для обеспечения условия равенства энергетических характеристик системы ММО необходимо выполнить нормирование матрицы импедансов:

$$\mathbf{Z}^{\text{norm}} = \frac{\mathbf{Z}}{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{Z} \mathbf{Z}^H)}}, \quad (5)$$

где $\text{tr}(X)$ – след матрицы X .

2. Электродинамические модели антенных систем с фрактальной геометрией излучателей, расположенных на киральных подложках

В данном исследовании была рассмотрена система ММО 2×2 , в которой были использованы несколько пар фрактальных антенных систем с подложками из киральных метаматериалов (одна приемная, другая, соответственно, передающая). Кроме того, в целях оценки выигрыша спектральной эффективности были также использованы антенные системы с диэлектрическими подложками,

относительная диэлектрическая проницаемость которых была положена равной 1 ($\epsilon_c = 1$).

Были рассмотрены следующие типы подложек из киральных метаматериалов:

- Биизотропные подложки с хаотической ориентацией киральных элементов – спиралей;
- Бианизотропные подложки с одинаковой ориентацией киральных элементов – спиралей.

Данные киральные элементы (спирали) были размещены в однородном диэлектрическом контейнере с относительной диэлектрической проницаемостью 1 ($\epsilon_c = 1$). Это связано с тем, что на практике обычно используется материал с небольшой диэлектрической проницаемостью, например пенополистирол.

Важным вопросом является определение резонансной частоты (резонансных частот) кирального метаматериала, вблизи которой проявляются данные киральные свойства. Одним из подходов к определению резонансной частоты кирального метаматериала является использование формулы Томсона:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (6)$$

где L – индуктивность киральных элементов; C – емкость элементов.

Рассмотрим одиночную тонкопроволочную металлическую спираль (рис. 1). Данная спираль выполнена из тонкой проволоки, радиус которой составляет r_H . Спираль состоит из N_H витков, расположенных на расстоянии h_H друг от друга, а ее внутренний радиус равен R_H . Длина спирали в развернутом состоянии (длина тонкой проволоки) составляет l_H . Высота спирали равна H_H , а угол накрутки – α_H .

Для вычисления индуктивности спирали воспользуемся формулой для определения индуктивности соленоида:

$$L_H = \mu_0\mu_c \frac{S_H N_H^2}{H_H} = \mu_0\mu_c \frac{\pi R_H^2 N_H^2}{H_H}, \quad (7)$$

где μ_c – относительная магнитная проницаемость среды; $S_H = \pi R_H^2$ – площадь витка спирали.

Емкость спирали определяется основными тремя составляющими (8): во-первых, емкостью проволоки C_{wire} , из которой она выполнена; во-вторых, межвитковой емкостью C_{it} ; в-третьих, при наличии группы спиралей, расположенных близко друг от друга, межэлементной емкостью C_{elem} :

$$C_H = C_{wire} + C_{it} + C_{elem}. \quad (8)$$

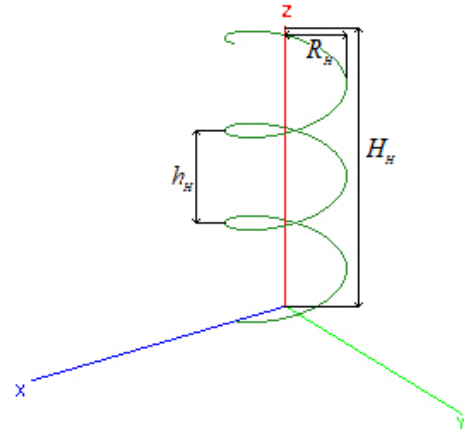


Рис. 1. Спираль
 Fig. 1. Spiral

Емкость проволоки спирали вычисляется в соответствии с выражением определения емкости прямолинейного проводника:

$$C_{wire} = \epsilon_0\epsilon_c \frac{l_H}{18 \ln\left(\frac{2l_H}{r_H}\right) - 1} 10^{-9}, \quad (9)$$

где $l_H = 2\pi(R_H + 2r_H)N_H + H_H$ – длина спирали в развернутом состоянии.

Межвитковая емкость определяется следующим образом:

$$C_{it} = \epsilon_0\epsilon_c \frac{S_{it}(N_H - 1)}{h_H}, \quad (10)$$

где $S_{it} = \pi \left[(R_H + 2r_H)^2 - R_H^2 \right]$ – это площадь кольца, образуемая одним витком проволоки.

Расстояние между соседними витками h_H вычисляется как:

$$h_H = \frac{H_H}{N_H + 1}. \quad (11)$$

И наконец, межэлементная емкость определяется формулой

$$C_{elem} = \epsilon_0\epsilon_c k_H \frac{S_{elem}}{A_0}, \quad (12)$$

где $S_{elem} = \frac{N_H(2R_H + 2r_H)}{\cos(\alpha_H)} 2r_H$ – площадь пространства, занимаемого спиральными элементами; k_H – пространственный коэффициент; $\alpha_H = \frac{\pi}{2(N_H + 1)}$ – угол накрутки проволоки.

Пространственный коэффициент k_H зависит от расположения и ориентации спиралей. Для случая рассматриваемой биизотропной киральной подложки (когда спирали имеют хаотическую

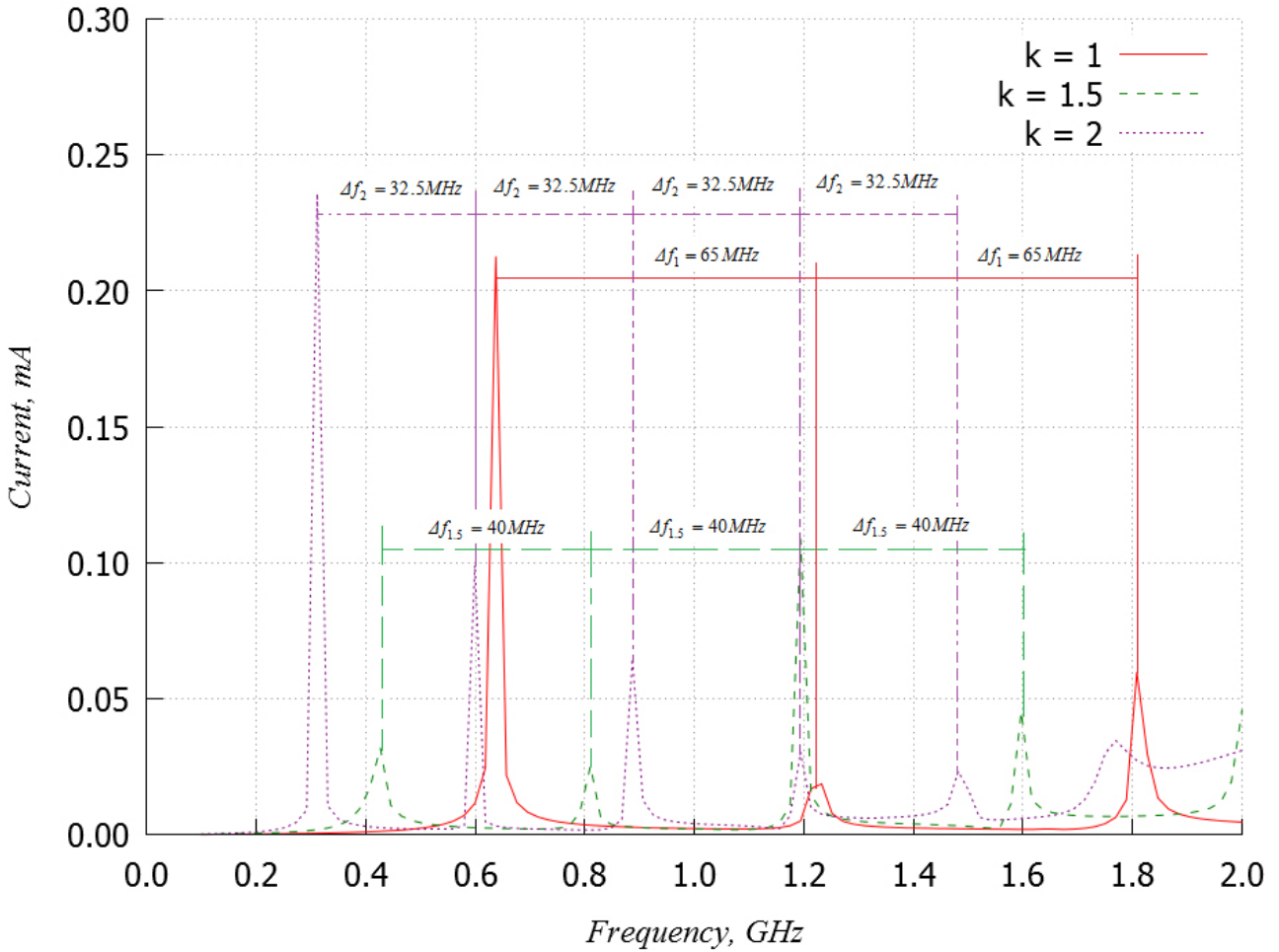


Рис. 2. Зависимость токовой функции спирали от частоты
 Fig. 2. Dependence of the current function of the spiral on the frequency

ориентацию и каждую спираль окружают от 3 до 8 спиралей), данный коэффициент был положен равным $k_H = 0,25$.

Подставляя выражения (9), (10) и (12) в (8), получим аналитическое выражение для расчета полной емкости кирального метаматериала на основе спиралей.

Однако формула Томсона (6) определяет лишь первую резонансную частоту кирального элемента. По факту таких резонансных частот может быть гораздо больше. Строгий электродинамический анализ (для расчета токовой функции использовался метод моментов) одиночной спирали, а также кирального метаматериала в целом показал, что в некоторой полосе частот резонансные частоты спирали пропорциональны разности двух близких резонансных частот, т. е. коэффициент пропорциональности равен $\Delta f \approx f_{0n} - f_{0n-1}$. В таком случае резонансные частоты определяются в соответствии со следующим выражением:

$$f_{0n} \approx n\Delta f \quad (13)$$

При условии допущения определенной погрешности в качестве частоты f_{0n-1} может быть выбрано нулевое значение, что, в свою очередь, позволяет определить коэффициент пропорциональности как $\Delta f \approx f_0$. Следует отметить, что формула (13) справедлива для случаев, когда имеет место одновременное пропорциональное изменение высоты H_H спирали и ее радиуса R_H (рис. 2), т. е. $f_{0n} \approx n\Delta f$ при $k(H_H, R_H)$, где $k \in (0, +\infty)$.

На рис. 3 приведена электродинамическая модель антенной системы с бианизотропной киральной подложкой, на которой расположен излучатель, представляющий собой диполь Серпинского [10; 11].

Физика работы фрактального излучателя (диполя Серпинского) объясняется тем, что при подключении источника ЭДС к вершине плеча антенны (треугольнику) по нему начинает распространяться электрический ток в направлении его основания. При достижении кластера, размеры которого сравнимы с длиной волны, происходит

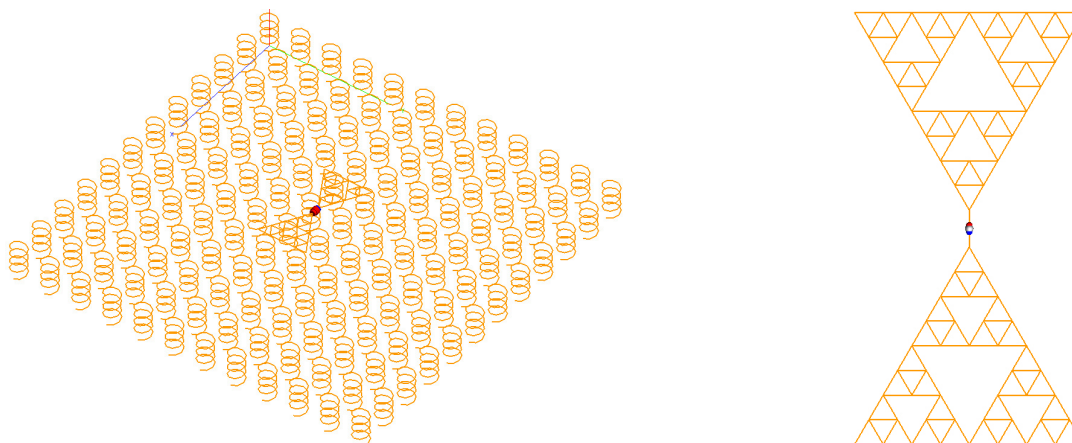


Рис. 3. Модель антенной системы с диполем Серпинского
 Fig. 3. Model of an antenna system with a Sierpinski dipole

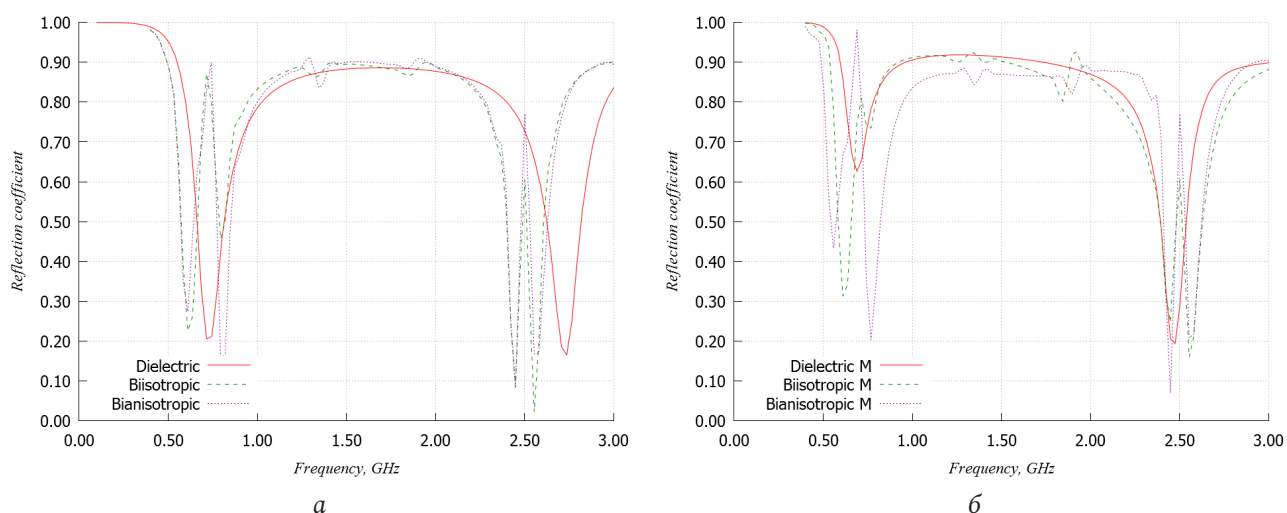


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения от частоты АСС
 Fig. 4. Dependences of reflection coefficients on ACC frequency

излучение электромагнитных волн. Аналогичным образом на каждой частоте поверхностный ток локализуется в областях соответствующих по размерам кластеров, в связи с чем антенная система в целом проявляет резонансные свойства каждого такого кластера. Количество кластеров определяется порядком фрактальности. На рис. 3 представлен излучатель, имеющий 4-й порядок фрактальности, т. е. разбиение на треугольники происходит за 4 итерации.

На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов отражения от частоты антенных систем с диэлектрической, бианизотропной и биизотропной киральными подложками (рис. 4, а), в т. ч. и металлизированными с нижней стороны (рис. 4, б), на которых располагается диполь Серпинского (АСС).

На рис. 5 представлены диаграммы направленности (ДН) АСС с бианизотропной киральной

подложкой, выполненной из правовинтовых спиралей, в вертикальной (рис. 5, а) и азимутальной (рис. 5, б) плоскостях.

Как видно из рис. 4, такие АСС работают в двух достаточно сильно разнесенных частотных диапазонах, причем в случае наличия металлизации антенные системы с подложками из кирального метаматериала согласованы гораздо лучше.

Как видно из данных ДН, на нижней частоте 675 МГц такая АСС имеет азимутальное излучение электромагнитных волн, т. е. на частотах резонанса бианизотропной киральной подложки происходит азимутальное рассеяние нормально падающих волн.

На рис. 6 приведена электродинамическая модель антенной системы с биизотропной киральной подложкой, на которой расположен фрактальный излучатель ФРМ.

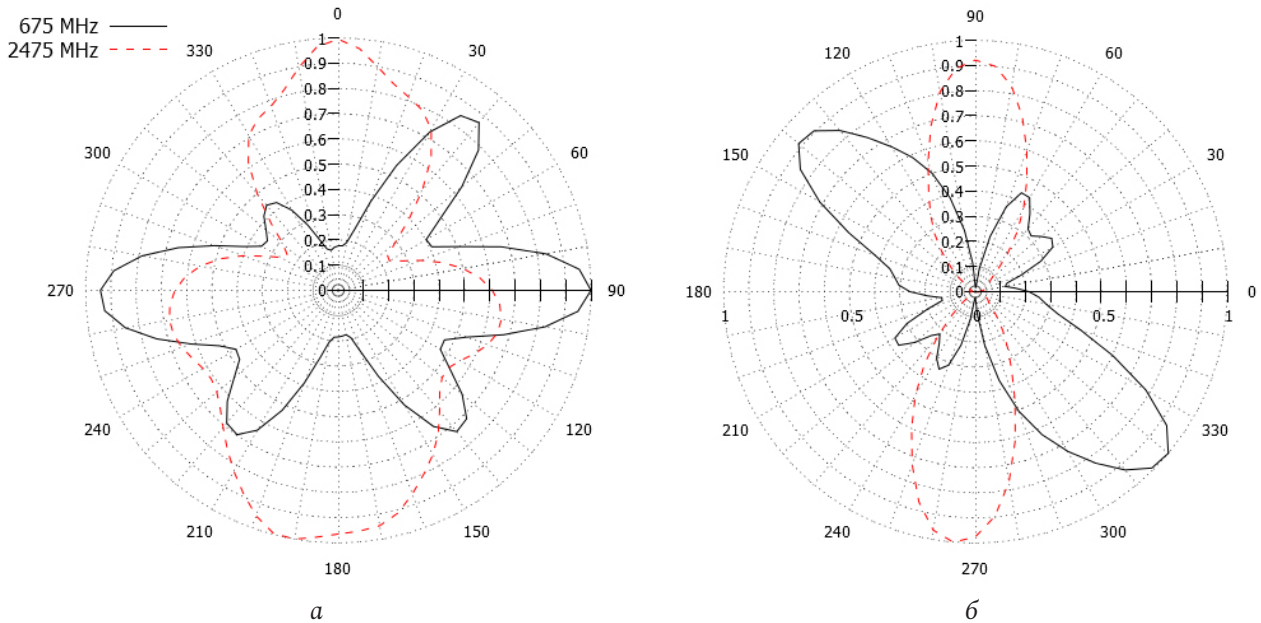


Рис. 5. ДН ACC
Fig. 5. RP of ACC

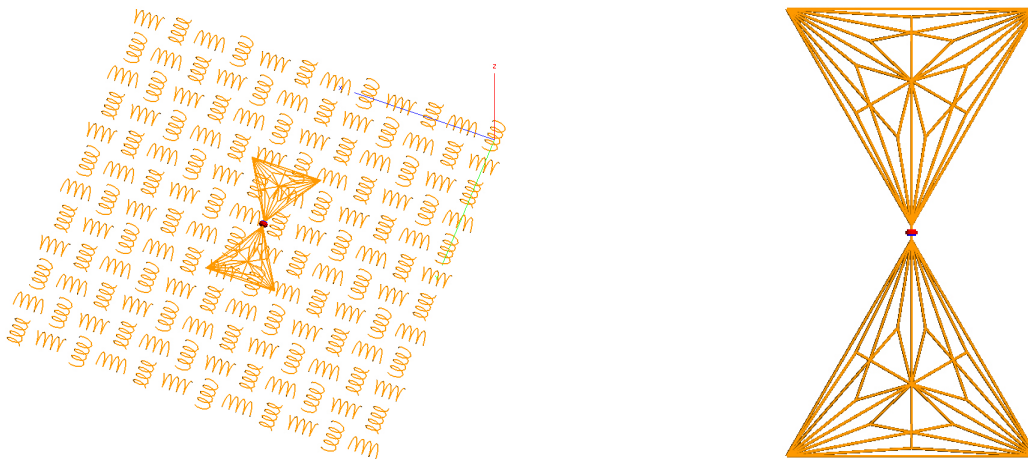


Рис. 6. Модель антенной системы с ФРМ излучателем
Fig. 6. Model of an antenna system with a PRM emitter

Плечи ФРМ представляют собой треугольники, которые получаются в результате выполнения рекурсивной процедуры (число итераций в данном случае равно 3) соединения центров масс треугольников и их углов (по аналогии с проведением медиан треугольника). Именно благодаря данной аналогии – фрактального разбиения медианами – данная антенна и получила свое название [10; 11].

На рис. 7 представлены зависимости коэффициентов отражения от частоты антенных систем с диэлектрической, бианизотропной и биизотропной киральными подложками, на которых располагается диполь ФРМ (АСФРМ).

Как видно, такой излучатель ФРМ в целом может также работать в двух частотных диапазонах.

На рис. 8 представлены диаграммы направленности АСФРМ с биизотропной киральной подложкой, выполненной из левовинтовых спиралей, в вертикальной (рис. 8, а) и азимутальной (рис. 8, б) плоскостях.

Как видно из представленного рис. 8, АСФРМ имеет азимутальное излучение электромагнитных волн уже на двух резонансных частотах.

На рис. 9 приведена электродинамическая модель антенной системы с бианизотропной киральной подложкой, на которой расположен фрактальный излучатель, представляющий собой кривую Гильберта (АСГ).

Следует отметить, что в целях выравнивания потенциалов, что позволяет избежать возникновения

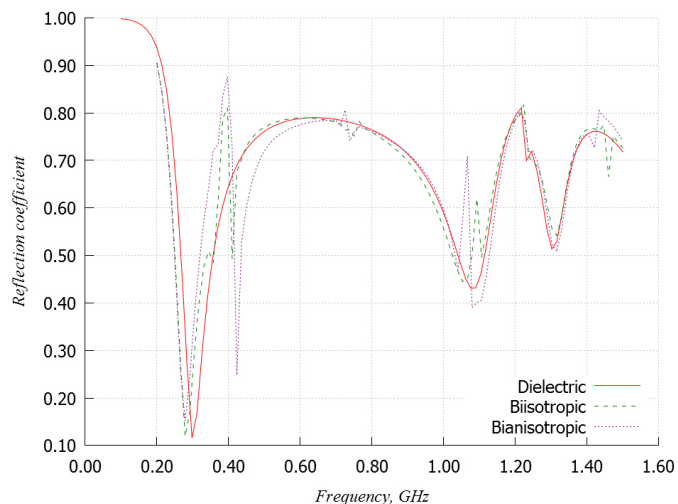


Рис. 7. Зависимости коэффициентов отражения от частоты АСФРМ
 Fig. 7. Dependences of the reflection coefficients on the frequency of ASFRM

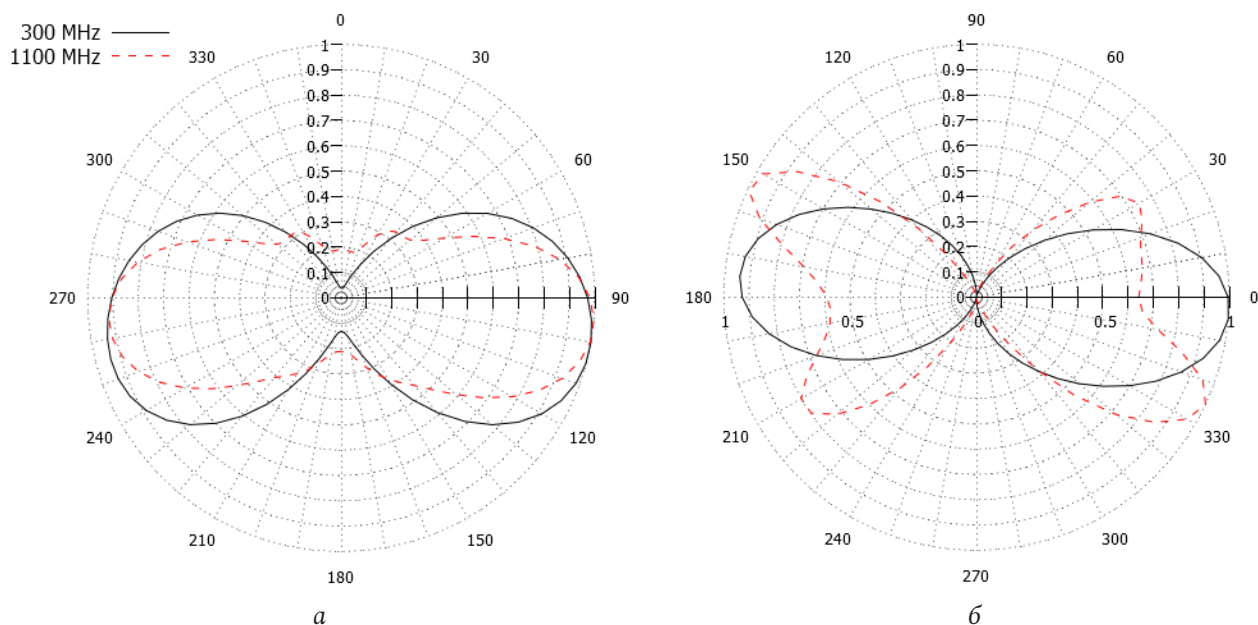


Рис. 8. ДН АСФРМ
 Fig. 8. RP of ASFRM

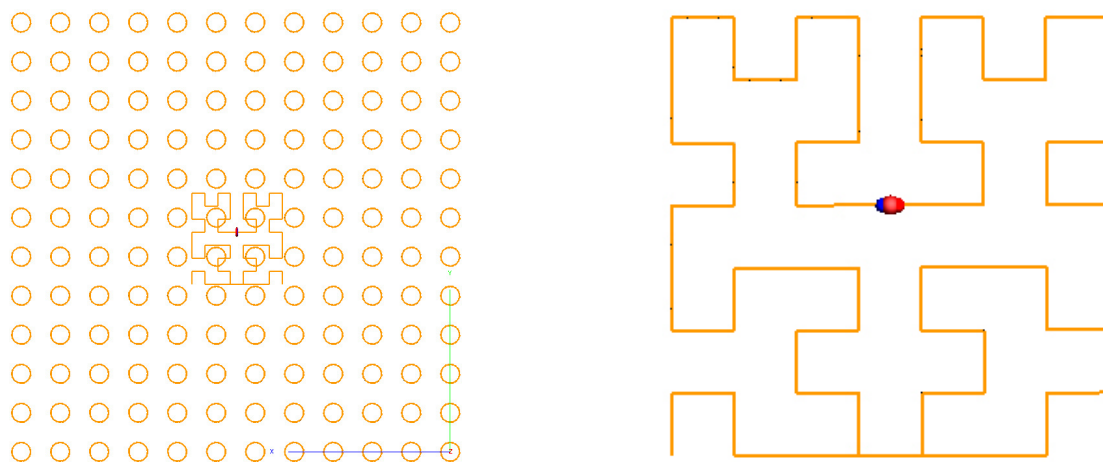


Рис. 9. Модель АСГ с бианизотропной киральной подложкой
 Fig. 9. Model of an ASG with a bianisotropic chiral substrate

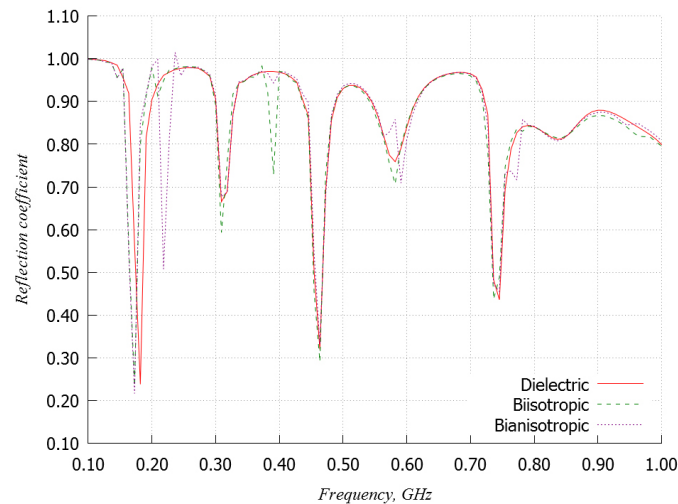


Рис. 10. Зависимости коэффициентов отражения от частоты АСГ
Fig. 10. Dependences of the reflection coefficients on the frequency of the LRA

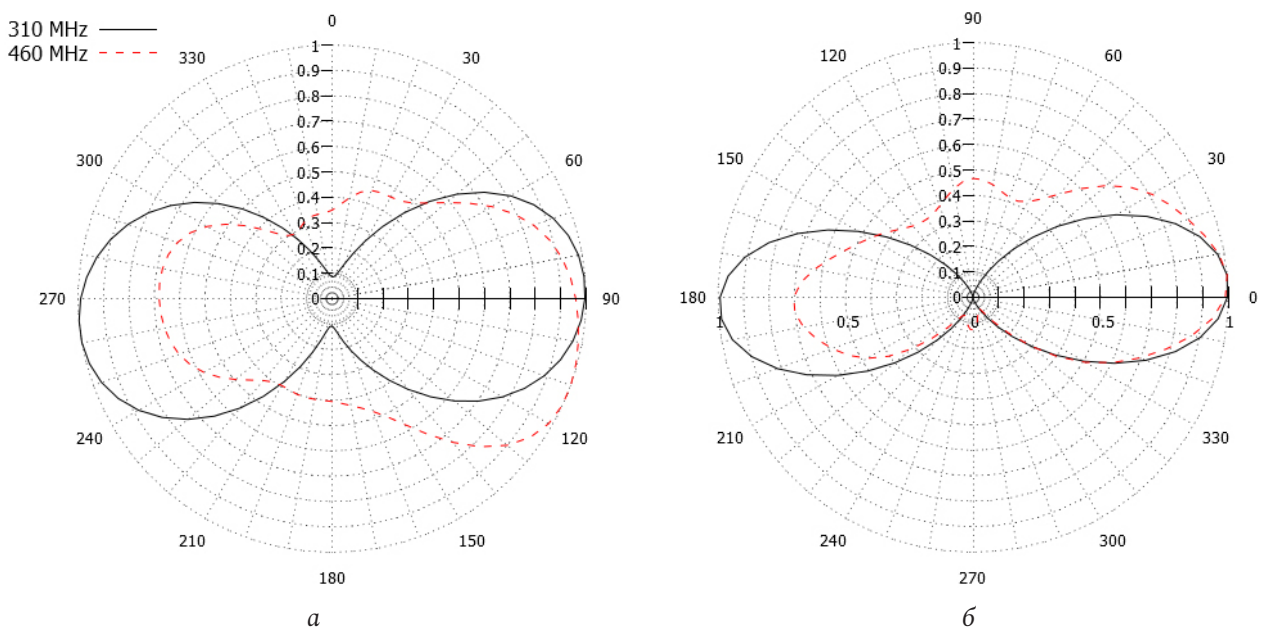


Рис. 11. ДН АСГ
Fig. 11. RP of LRA

противооткатных электромагнитных волн, использовалось шунтовое соединение в нижней части данной антенной системы.

На рис. 10 представлены зависимости коэффициентов отражения от частоты антенных систем с диэлектрической, бианизотропной и биизотропной киральными подложками, на которых располагается излучатель в виде фрактальной кривой Гильберта (АСГ).

Из рис. 10 видно, что АСГ имеет как минимум три резонанса при волновом сопротивлении, равном 50 Ом, однако при другом волновом сопротивлении фидера возможно согласование антенной системы и в других частотных диапазонах.

На рис. 11 представлены диаграммы направленности АСГ с бианизотропной киральной подложкой, выполненной из левовинтовых спиралей, в вертикальной (рис. 11, а) и азимутальной (рис. 11, б) плоскостях, рассчитанных на резонансных частотах, в частности на 310 и 460 МГц.

На рассмотренных резонансных частотах так же, как и в предыдущих случаях, имеет место эффект азимутального рассеяния.

И наконец, на рис. 12 приведена электродинамическая модель антенной системы с биизотропной киральной подложкой, на которой расположен фрактальный излучатель, представляющий собой кривую Коха (АСК).



Рис. 12. Модель АСК с биизотропной киральной подложкой
Fig. 12. ASK model with biisotropic chiral substrate

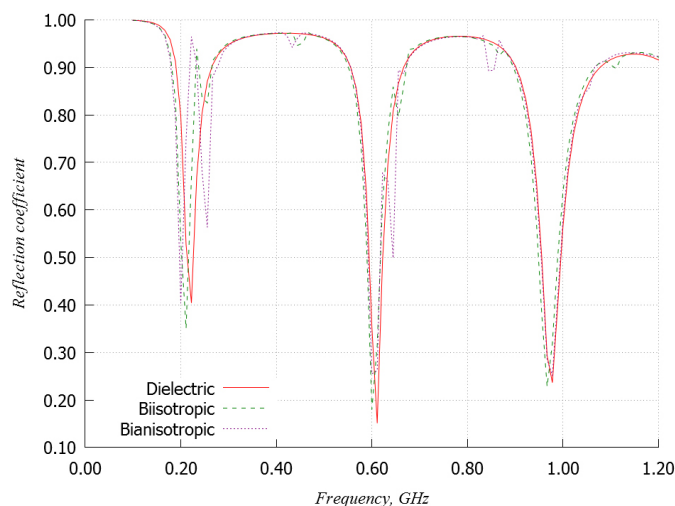


Рис. 13. Зависимости коэффициентов отражения от частоты АСК
Fig. 13. Dependences of the reflection coefficients on the frequency of the LRA

На рис. 13 представлены зависимости коэффициентов отражения от частоты антенных систем с диэлектрической, бианизотропной и биизотропной киральными подложками, на которых располагается излучатель в виде фрактальной кривой Коха (часть снежинки Коха) (АСК).

В данном случае у такой антенной системы с фрактальным излучателем Коха явно выражены 3 рабочих диапазона частот.

На рис. 14 представлены диаграммы направленности АСК с биизотропной киральной подложкой, выполненной из левовинтовых спиралей, в вертикальной (рис. 14, а) и азимутальной (рис. 14, б) плоскостях, рассчитанных на резонансных частотах, в частности на 220, 610 и 970 МГц.

Во всех рабочих диапазонах, как видно из представленных на рис. 11 диаграмм направленностей, данная антенная с биизотропной киральной подложкой, на которой располагается фрактальный

излучатель Коха, обладает азимутальным направлением излучения электромагнитных волн.

3. Оценка спектральной эффективности МИМО систем при использовании антенных комплексов с подложками из киральных метаматериалов и фрактальной геометрией излучателей

Для оценки спектральной эффективности МИМО систем использовались антенные комплексы с подложками из киральных метаматериалов и фрактальной геометрией излучателей. На таких киральных подложках антенных систем параллельно друг другу на фиксированном расстоянии были расположены два фрактальных излучателя различных типов, рассматриваемых выше.

На рис. 15 представлены зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании антенных систем с диэлектрической,

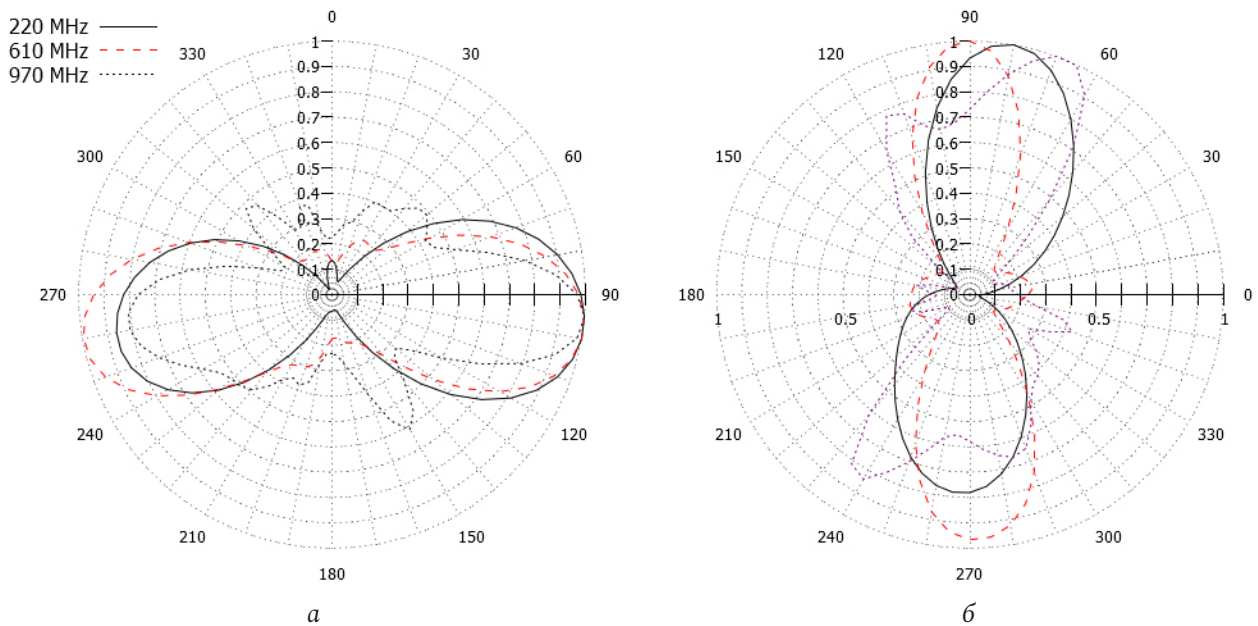


Рис. 14. ДН АСК
Fig. 14. RP of ASK

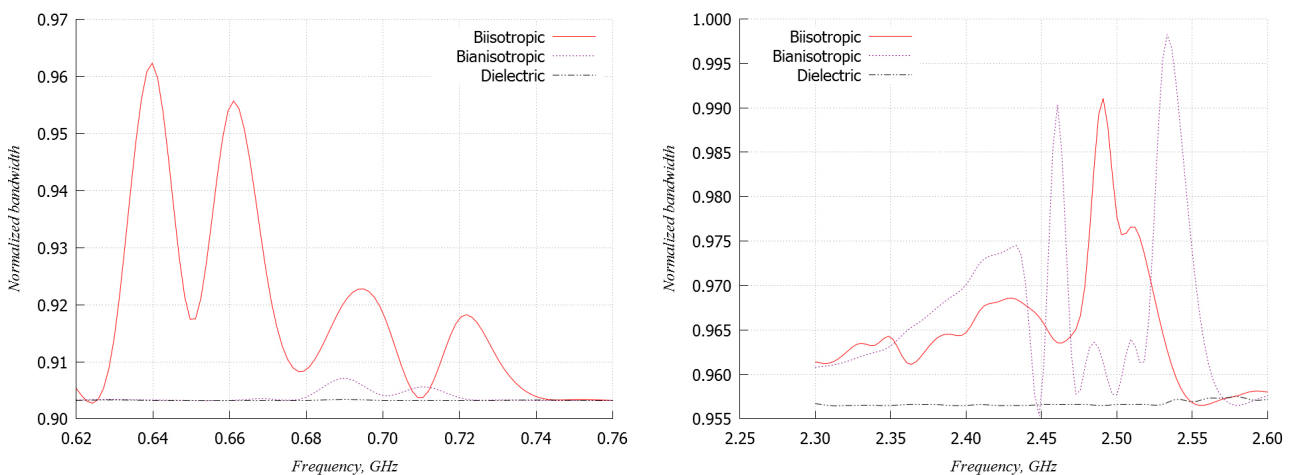


Рис. 15. Зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании АСК с различными подложками
Fig. 15. Dependences of spectral efficiency on frequency when using ACC with various substrates

биизотропной и бианизотропной подложками, на которых располагается пара диполей Серпинского, а на рис. 16 – аналогичные зависимости с тем лишь отличием, что такие антенные системы располагаются на бесконечно тонкой и идеальной проводящей поверхности (основания).

Как видно из представленных зависимостей, антенные системы на киральных подложках, на которых располагаются диполи Серпинского, могут обеспечить выигрыш в спектральной эффективности по сравнению с антенными системами на диэлектрических подложках, причем в двух частотных диапазонах. В нижнем диапазоне наибольший выигрыш обеспечивают антенные системы на биизотропных киральных подложках,

в верхнем диапазоне – как на биизотропных, так и на бианизотропных.

На рис. 17 представлены зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании антенных систем с диэлектрической, биизотропной и бианизотропной подложками, на которых располагается пара фрактальных излучателей ФРМ.

Аналогичным образом такие антенные системы с ФРМ излучателем на киральных подложках обеспечивают выигрыш в спектральной эффективности в двух частотных диапазонах. Однако по сравнению с антенными системами с диполем Серпинского данные АСФРМ, во-первых, обладают меньшей полосой частот, в которой наблюдает-

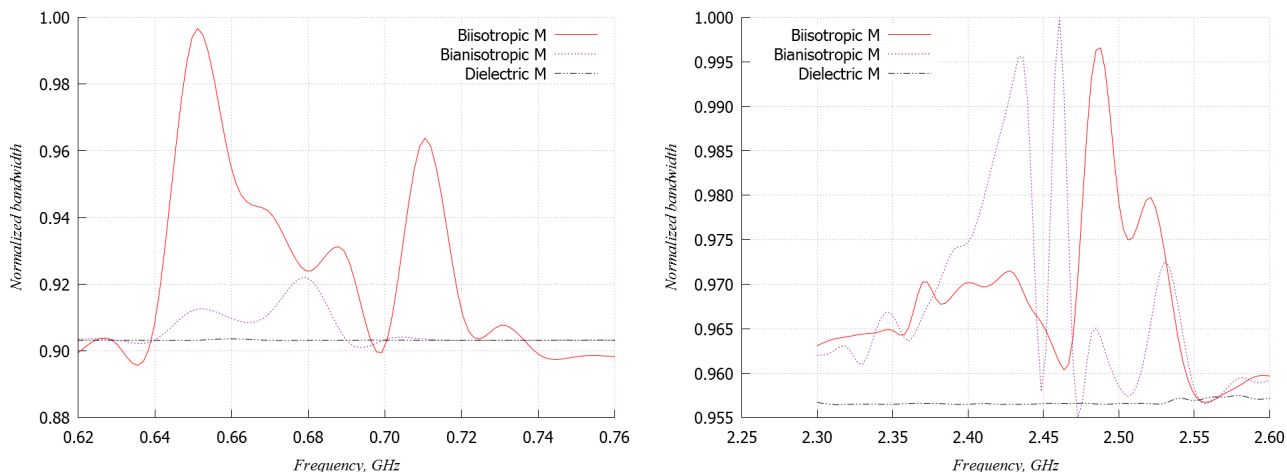


Рис. 16. Зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании АСС с различными подложками с односторонней металлизацией
 Fig. 16. Dependences of spectral efficiency on frequency when using ACC with various substrates with one-sided metallization

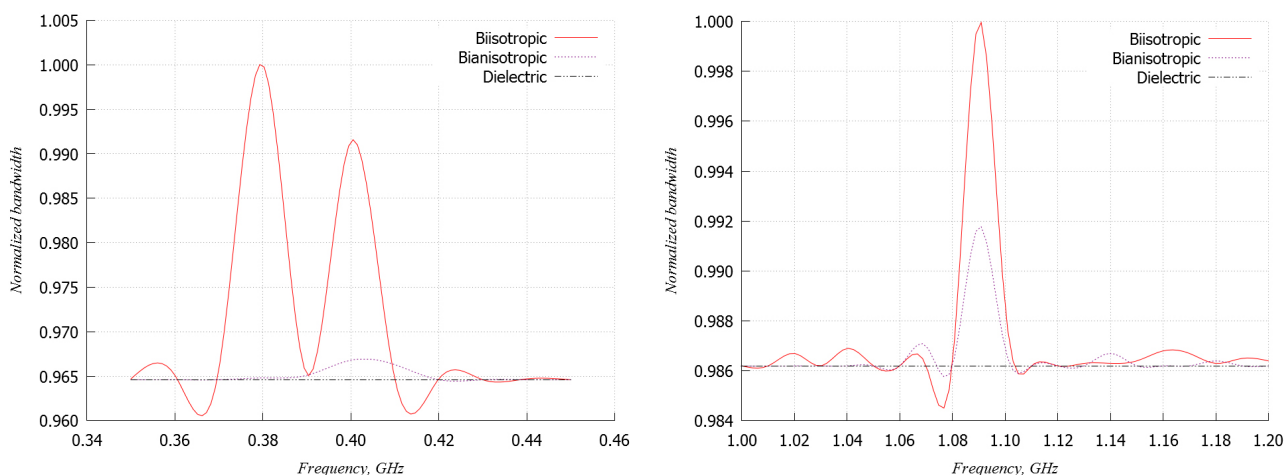


Рис. 17. Зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании АСФРМ с различными подложками
 Fig. 17. Dependences of spectral efficiency on frequency when using ASFRM with various substrates

ся выигрыш, а во-вторых, гораздо меньшим приростом выигрыша спектральной эффективности.

На рис. 18 представлены зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании антенных систем с диэлектрической, биизотропной и бианизотропной подложками, на которых располагается пара излучателей, выполненных в виде фрактальных кривых Гильберта (рис. 18, а) и Коха (рис. 18, б).

Как видно из представленных графиков, такие антенные системы с излучателями в виде фрактальных кривых Гильберта и Коха в целом позволяют повысить спектральную эффективность в трех небольших рабочих полосах частот. Однако на практике в такой частотной области обычно используются большие по ширине диапазоны, в связи с чем такие решения антенных систем являются весьма специфическими.

Как уже было отмечено, в антеннах с подложками из киральных метаматериалов на резонансных частотах поверхность подложки становится высокоомной, в связи с чем имеет место большее затухание поверхностных волн, что приводит к снижению взаимного влияния излучателей (увеличения развязки между ними), что, в свою очередь, способствует повышению спектральной эффективности.

Заключение

Таким образом, исследование антенных комплексов с использованием киральных метаматериалов и фрактальной геометрии излучателей для систем ММО позволяет увеличить их спектральную эффективность по сравнению с антенными комплексами на диэлектрических подложках. Следует отметить, что такое решение является весьма специфическим, поскольку обладает относительно небольшой рабочей полосой частот.

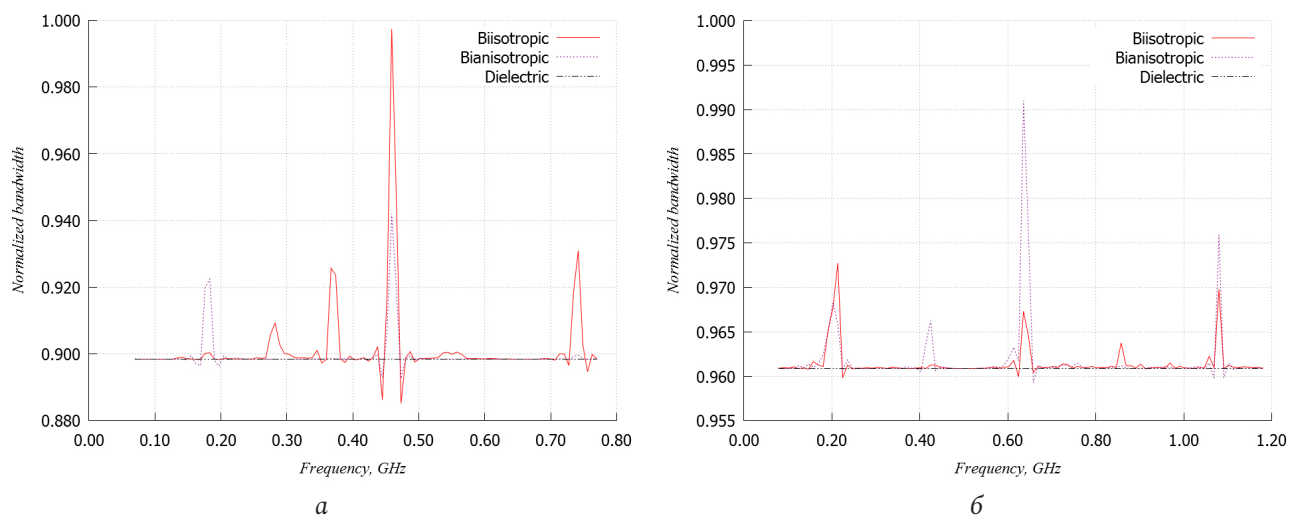


Рис. 18. Зависимости спектральной эффективности от частоты при использовании АСГ (а) и АСК (б) с различными подложками
Fig. 18. Dependences of spectral efficiency on frequency when using ASG (a) and ASA (b) with different substrates

Список литературы

- Gershman A.B., Sidiropoulos N.D. *Space-Time Processing for MIMO Communications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 369 p.
- Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels // *European Transactions on Telecommunications*. 1999. Vol. 10, № 6. P. 585–595. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4460100604>.
- Возможности повышения пропускной способности в системах МИМО путем использования антенн на основе метаматериалов / А.Н. Беспалов [и др.] // *Радиотехника*. 2018. № 4. С. 87–91.
- Микрополосковые антенны на основе биизотропных и бианизотропных киральных метаматериалов в системах МИМО / А.Н. Беспалов [и др.] // *Радиотехника*. 2019. № 3. С. 5–11.
- Неганов В.А., Осипов О.В. *Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами*. М.: Радио и связь, 2006. 280 с.
- Electromagnetic-Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media* / A.H. Sihvola [et al.]. Boston: Artech House, 1994. 352 p.
- 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. URL: <https://journals.ssau.ru/index.php/pwp/article/view/7078>.
- Hirvonen M., Sten J.C.-E. Power and Q of a horizontal dipole over a metamaterial coated conducting surface // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2008. Vol. 56, № 3. P. 684–690. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.916937>.
- Потапов А.А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
- Нарышкин М.И. *Фрактальные антенны для базовых станций разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи* // *Антенны*. 2017. № 1. С. 22–27.
- Нарышкин М.И. *Антенны для передвижных базовых станций подвижной радиосвязи на основе структур сложной конфигурации* // *Антенны*. 2017. № 2. С. 14–21.
- Паршин Ю.Н., Комиссаров А.В. Пропускная способность МИМО телекоммуникационной системы в условиях изменяющейся пространственной структуры радиотракта с искусственной многолучевостью // *Цифровая обработка сигналов*. 2012. № 1. С. 50–55. URL: http://www.dspa.ru/articles/year2012/jour12_1/art12_1_9.pdf.
- Sibille A., Oestges C., Zanella A. *MIMO: From Theory to Implementation*. Cambridge: Academic Press, 2011. 703 p.

References

- Gershman A.B., Sidiropoulos N.D. *Space-Time Processing for MIMO Communications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006, 369 p.
- Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, vol. 10, no. 6, pp. 585–595. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4460100604>.
- Bespalov A.N. et al. Opportunities for increasing throughput in MIMO systems using metamaterial antennas. *Radiotekhnika*, 2018, no. 4, pp. 87–91. (In Russ.)
- Bespalov A.N. et al. Microstrip antennas based on biisotropic and bianisotropic chiral metamaterials in MIMO systems. *Radiotekhnika*, 2019, no. 3, pp. 5–11. (In Russ.)
- Neganov V.A., Osipov O.V. *Reflective, Waveguiding and Radiating Structures with Chiral Elements*. Moscow: Radio i svjaz', 2006, 280 p. (In Russ.)
- Sihvola A.H. et al. *Electromagnetic-Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media*. Boston: Artech House, 1994, 352 p.
- Buzov A.L. et al. Prospects for the use of metamaterials in new generation antennas. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 15–20. URL: <https://journals.ssau.ru/index.php/pwp/article/view/7078>. (In Russ.)

8. Hirvonen M., Sten J.C.-E. Power and Q of a horizontal dipole over a metamaterial coated conducting surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, no. 3, pp. 684–690. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.916937>.
9. Potapov A.A. *Fractals in Radiophysics and Radar: Sample Topology*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Universitetskaja kniga, 2005, 848 p. (In Russ.)
10. Naryshkin M.I. Fractal antennas for base stations of branched corporate mobile radio networks. *Antenny*, 2017, no. 1, pp. 22–27. (In Russ.)
11. Naryshkin M.I. Antennas for mobile base stations of mobile radio communication based on structures of complex configuration. *Antenny*, 2017, no. 2, pp. 14–21. (In Russ.)
12. Parshin Ju.N., Komissarov A.V. The capacity of a MIMO telecommunication system in a changing spatial structure of a radio path with artificial multipath. *Tsifrovaja obrabotka signalov*, 2012, no. 1, pp. 50–55. URL: http://www.dsps.ru/articles/year2012/jour12_1/art12_1_9.pdf. (In Russ.)
13. Sibille A., Oestges C., Zanella A. *MIMO: From Theory to Implementation*. Cambridge: Academic Press, 2011, 703 p.

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 4, pp. 97–110

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.4.97-110

Received 23 September 2020
Accepted 16 October 2020

Research of antenna complexes using chiral metamaterials and fractal geometry of radiators for MIMO systems

Andrey N. Bespalov¹, Alexander L. Buzov², Dmitry S. Klyuev¹ , Anatoly M. Neshcheret² 

¹ Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

² JSC «Samara Innovative Business Radio Systems»

26, Kirov Avenue,
Samara, 443022, Russia

Abstract – This article is devoted to the study of the possibilities of increasing spectral efficiency in MIMO systems by using antennas with substrates of biisotropic and bianisotropic chiral metamaterials and various types of fractal emitters, in particular, fractal structures in the form of a Sierpinski triangle, Koch and Gilbert curves, as well as a dipole triangular antenna of complex configuration – FRM. The spectral efficiency was calculated by using one of the variations of the Shannon formula, which includes a complete matrix of Z-parameters. In turn, this matrix was determined using the software package of electrodynamic modeling. It is shown that the use of such antennas with the fractal geometry of the emitters located on chiral substrates reduces the mutual influence between the emitters, and, in turn, increases the spectral efficiency in several frequency ranges compared to traditional solutions.

Keywords – fractal antenna, chiral metamaterial, MIMO, spectral efficiency.

Информация об авторах

Беспалов Андрей Николаевич, соискатель Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: антенны.

E-mail: nam@siprs.ru

Бузов Александр Львович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем», г. Самара, Россия. Автор более 200 научных работ.

Область научных интересов: теория антенн.

E-mail: buzov@siprs.ru

Клюев Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия. Автор более 200 научных работ.

Область научных интересов: теория излучения.

E-mail: klyuevd@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-7076>

Information about the Authors

Andrey N. Bespalov, postgraduate student of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: antennas.

E-mail: nam@siprs.ru

Alexander L. Buzov, Doctor of Technical Sciences, professor, general director of JSC «Samara Innovative Business Radio Systems», Samara, Russia. Author of over 200 scientific papers.

Research interests: antenna theory.

E-mail: buzov@siprs.ru

Dmitry S. Klyuev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, head of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. Author of over 200 scientific papers.

Research interests: theory of radiation.

E-mail: klyuevd@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-7076>

Нешчерет Анатолий Михайлович, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем», г. Самара, Россия. Автор более 100 научных работ.

Область научных интересов: теория излучения, киральные метаматериалы.

E-mail: neshceret_a@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-6190>

Anatoly M. Neshcheret, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, head of the laboratory of JSC «Samara Innovative Business Radio Systems», Samara, Russia. Author of over 100 scientific papers.

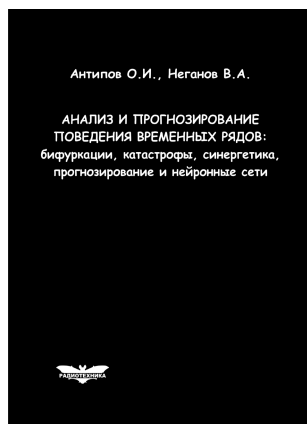
Research interests: theory of radiation, chiral metamaterials.

E-mail: neshceret_a@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-6190>

Антипов, О.И.

Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с.



ISBN 978-5-88070-294-7

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы, и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.