

МАЛОРАЗМЕРНЫЕ АНТЕННЫ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

МАЛОРОЗМІРНІ АНТЕНИ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

LOW DIMENSIONAL ANTENNAS OF CIRCULAR POLARIZATION

Аннотация. Рассмотрены проволочные антенны круговой поляризации, размеры которых не превышают половины длины волны. Для исследования наряду с турникетным и спиральным излучателями выбраны кольцевые, треугольные, квадратные и префрактальные конструкции малоразмерных антенн. На основе компьютерного моделирования проведен анализ и сопоставление частотных зависимостей входного импеданса, модуля коэффициента отражения, направленных и поляризационных характеристик таких антенн. Полученные результаты наглядно отображают достоинства и недостатки рассмотренных моделей.

Анотація. Розглянуті дровотві антени колової поляризації, розміри яких не перевищують половини довжини хвилі. Для дослідження поряд з турникетними й спіральними випромінювачами обрані кільцеві, трикутні, квадратні й префрактальні конструкції малорозмірних антен. На основі комп'ютерного моделювання проведений аналіз і порівняння частотних залежностей вхідного імпедансу, модуля коефіцієнта відображення, спрямованих і поляризаційних характеристик таких антен. Отримані результати наочно відображають достоїнства й недоліки розглянутих моделей.

Summary. Wire antennas of circular polarization which sizes do not exceed half of a wavelength are considered. For research alongside with tourniquet and spiral radiators are chosen ring, triangular, square and pre-fractal designs of low dimensional antennas. On the basis of computer modeling the analysis and comparison of frequency dependences of an input impedance, the module of factor of the reflection, the directed and polarizing characteristics of such aerials is lead{carried out}. The received results evidently display merits and demerits of the considered models.

Ускоряющееся количественное и качественное развитие радиоэлектронных средств различного назначения приводит к необходимости разработки и исследования характеристик новых антенных элементов, применяемых как самостоятельно, так и в составе более сложных антенных систем.

Одними из наиболее интересных представляются, с точки зрения практического применения, плоские (либо квазиплоские) антенны круговой поляризации, размеры которых не превышают половины длины волны. К ним, например, можно отнести вибраторные турникетные конструкции [1], а также плоские спиральные антенны [2].

Следует отметить, что особый научный и практический интерес представляют фрактальные антенны [3...5] – новое направление в антенной практике. На основе фрактальных элементов [6,7] итерации первого или второго порядка (префракталов) Пеано или Кох возможно построение треугольных, квадратных и круговых малоразмерных антенных элементов с круговой поляризацией излучаемого поля.

Однако свойства антенн с круговой поляризацией в виде малоразмерных треугольных, круговых, квадратных рамок и в особенности сформированных на основе различных фрактальных конструкций недостаточно или вовсе не исследованы.

В данное время не существует строгой электродинамической теории, объясняющей и предсказывающей свойства антенных структур, построенных в виде фрактальных конструкций. Поэтому **целью данной работы** является исследование электродинамических характеристик упомянутых типов антенных элементов путем численного моделирования в среде компьютерного программного комплекса FEKO [8].

1. Модели антенных элементов. Далее будут рассмотрены двумерные (квазиплоские) проволочные конструкции, а именно такие, где все конструктивные элементы расположены в одной плоскости. Как известно [9], на практике широко применяются антенны круговой поляризации в виде системы ортогональных полуволновых вибраторов (рис. 1, а), питаемых с 90° фазовым сдвигом (турникетные конструкции), либо плоских спиралей, в частности, двухзаходные архимедовы спирали противофазного питания (рис. 1, б).

Максимальный размер таких конструктивных элементов можно охарактеризовать радиусом r_0 и периметром $L_0 = 2\pi r_0$ окружности (пунктирная линия), в которую вписан данный элемент. Для турникетной антенны эта величина примерно равна $\lambda_0 / 4$, где λ_0 – максимальная длина волны, при которой мнимая часть входного сопротивления обращается в ноль (первый резонанс).

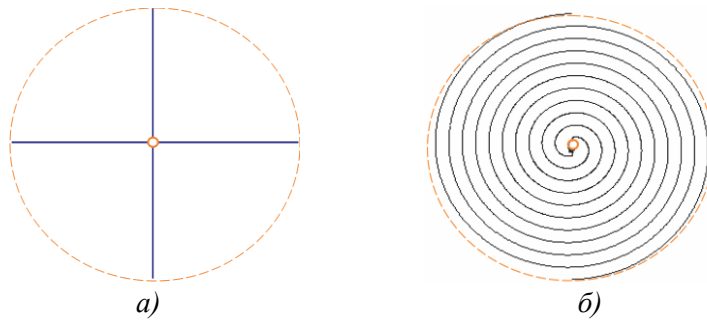


Рисунок 1 – Традиционные конструкции антенн круговой поляризации

Малоразмерные антенны круговой поляризации могут создаваться на основе «рамочных» конструкций треугольной, круговой и квадратной формы, возбуждаемых тремя (рис. 2, а и б) либо четырьмя (рис. 2, в) равноамплитудными источниками.

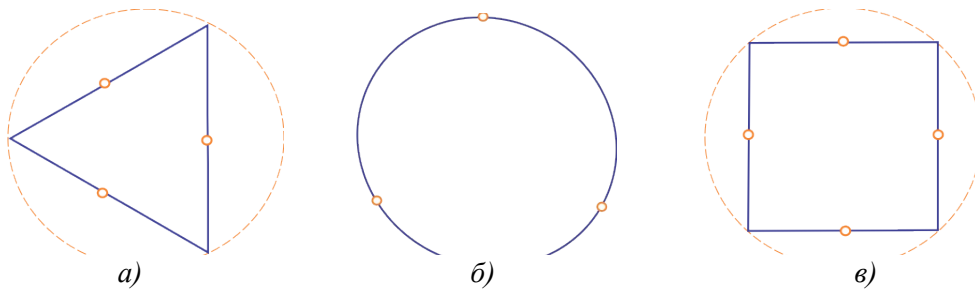


Рисунок 2 – Простейшие формы малоразмерных антенных элементов

В этом случае для формирования поля с круговой поляризацией фазы возбуждения чередуют по схеме $0^\circ; 120^\circ; 240^\circ$ (при трех источниках) или $0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ (при четырех), причем расположение точек возбуждения должно быть симметричным.

Особенностью *фрактальных* проволочных конструкций антенн является «уплотнение» занимаемого пространства, при этом появляется возможность понижения резонансных частот.

Фракталом принято называть структуру, состоящую из частей подобных целому. В антенных задачах для построения фрактального множества обычно используется лишь первые итерационные формы (называемые префракталами или предфракталами), обладающие свойством самоподобия (инвариантности к изменению масштаба или скейлинга) в конечных масштабах.

Одна из первых конструкций фрактальных антенн представляет собой проволочную антенну в виде кривой фон Кох (названной в честь шведского математика Helge von Koch) – префрактала первого порядка итерации. Для построения этой ломаной кривой исходный отрезок длиной a (инициатор) делится на три равные части.

Средний участок инициатора заменяют двумя сторонами ($b = a/3$) равностороннего треугольника и тем самым образуют ломаную кривую (генератор фрактала) из четырех звеньев (рис. 3, а). Заменяя средний участок инициатора П-образным элементом со сторонами равными $b = a/3$ и высотой $h = b$ можно получить фрактальный элемент (генератор фрактала) – один из вариантов кривой Пеано (рис. 3, б).

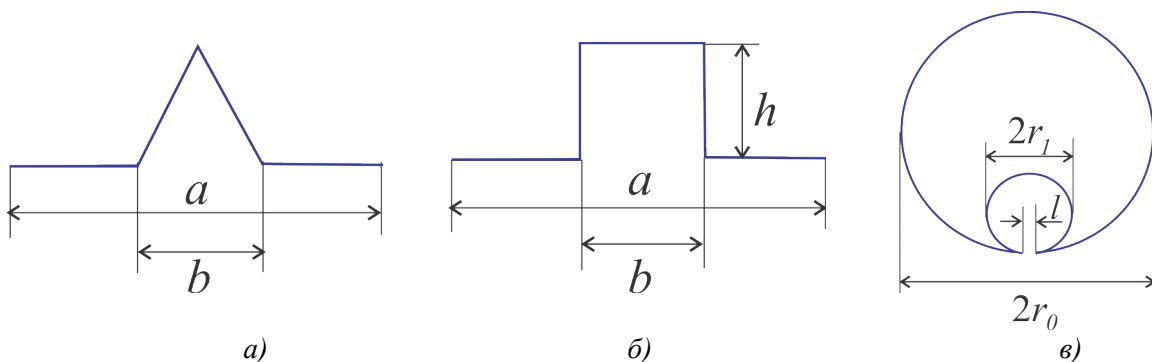


Рисунок 3 – Генераторы фрактала (префракталы, первая итерация)

Встречаются фрактальные круговые структуры, где основой является инициатор в виде частично разомкнутой окружности радиуса r_0 , а в генераторе фрактала ее часть замещается меньшей окружностью радиуса r_1 (рис. 3, в).

На основе этих префракталов можно сформировать излучатели круговой поляризации возбуждаемые в трех точках, на основе рамок Коха (рис. 4, а), Пеано (рис. 4, б) либо круговых фракталов, состоящих из трех секций (рис. 4, в). Назовем их «триадными» или «триадо-фракталами».

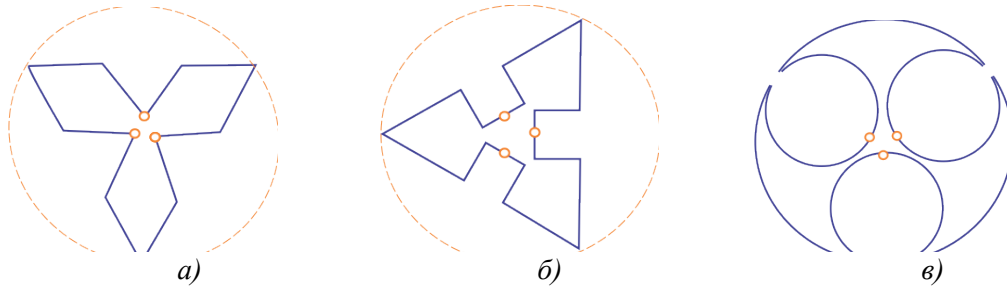


Рисунок 4 – Префрактальные «триадные» антенны круговой поляризации

Аналогично можно сформировать излучатели круговой поляризации возбуждаемых в четырех точках на основе кривых Коха (рис. 5, а), Пеано (рис. 5, б) либо круговых фракталов из четырех секций (рис. 5, в). Назовем их «квэрто-фракталами» (квэрто (лат.) – четыре),

При этом самопересечения или самокасания проводников устраняются путем небольшого уменьшения соответствующего размера генератора фрактала.

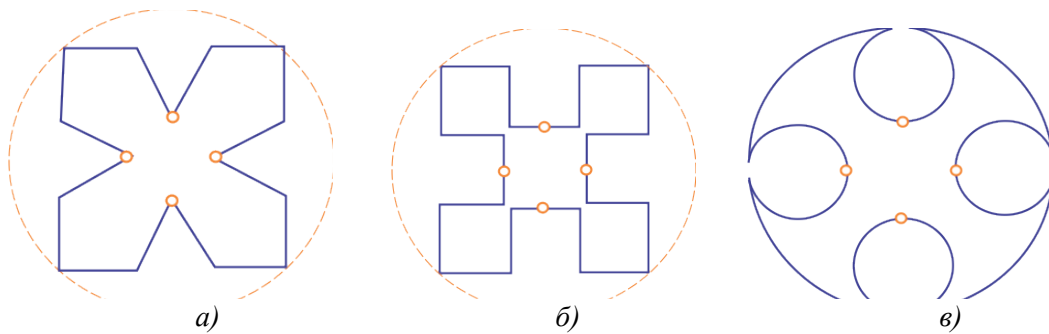


Рисунок 5 – «Квэрто-фрактальные» антенные элементы круговой поляризации

2. Методика исследования. В процессе компьютерного моделирования в среде программного комплекса FEKO исследовались характеристики моделей малоразмерных проволочных антенн круговой поляризации, конструктивные особенности которых изображены на рис. 2 ... 5.

Отметим, что используемый в FEKO для решения интегрального уравнения метод моментов предусматривает разбиение линейных проводящих элементов на малые по сравнению с длиной волны, сегменты с последующим решением системы линейных алгебраических уравнений. Это позволяет с приемлемой точностью определить амплитудно-фазовое распределение токов на сегментных элементах и дает возможность достаточно корректно рассчитать такие параметры антенны, как входное сопротивление и коэффициент отражения от входа, их поляризационные характеристики и построить диаграмму направленности.

Точность результатов получаемых при таком подходе тем выше, чем меньше размер Δ сегмента разбиения, который должен удовлетворять условию $\Delta < \lambda / 10$, где λ длина волны.

В приводимых ниже результатах компьютерного моделирования частота возбуждения варьировалась в пределах от 50 МГц до 950 МГц.

Для того чтобы обеспечить возможность корректного сравнения результатов, геометрические параметры антенн выбирались так, чтобы форма каждой антенны точно вписывалась в окружность радиусом $r_0 = \lambda_0 / 4$, где λ_0 – фиксированная длина волны, соответствующая частоте $f_0 = 300$ МГц. Радиус проводников антенн равен $\lambda_0 / 400$, длина сегмента разбиения Δl равна $\lambda_0 / 200$, что обеспечило нужную точность даже на максимальной частоте.

Модель двухзаходной спиральной антенны образована из пяти витков, при этом минимальный радиус спирали составлял 5 мм, а максимальный был равен r_0 .

3. Результаты численного моделирования. Входной импеданс. Показанные ниже графические изображения сгруппированы так, чтобы обеспечить возможность сопоставления характеристик близких по форме антенных элементов.

Например, рис. 6 иллюстрирует частотные зависимости действительной $R_{вх}$ и мнимой $X_{вх}$ части входного импеданса для «триадных» антенных элементов (возбуждение в трех точках).

В дополнение к этому в табл. 1 приведены значения коэффициента $k_\lambda = \lambda_p / \lambda_0$, характеризующего изменение резонансной длины волны λ_p , а также соответствующие ей величины КНД и входного импеданса $\dot{Z}_{вх} = R_{вх} + iX_{вх}$ для этих же антенных элементов. Для сравнения здесь же представлены аналогичные параметры турникетного излучателя.

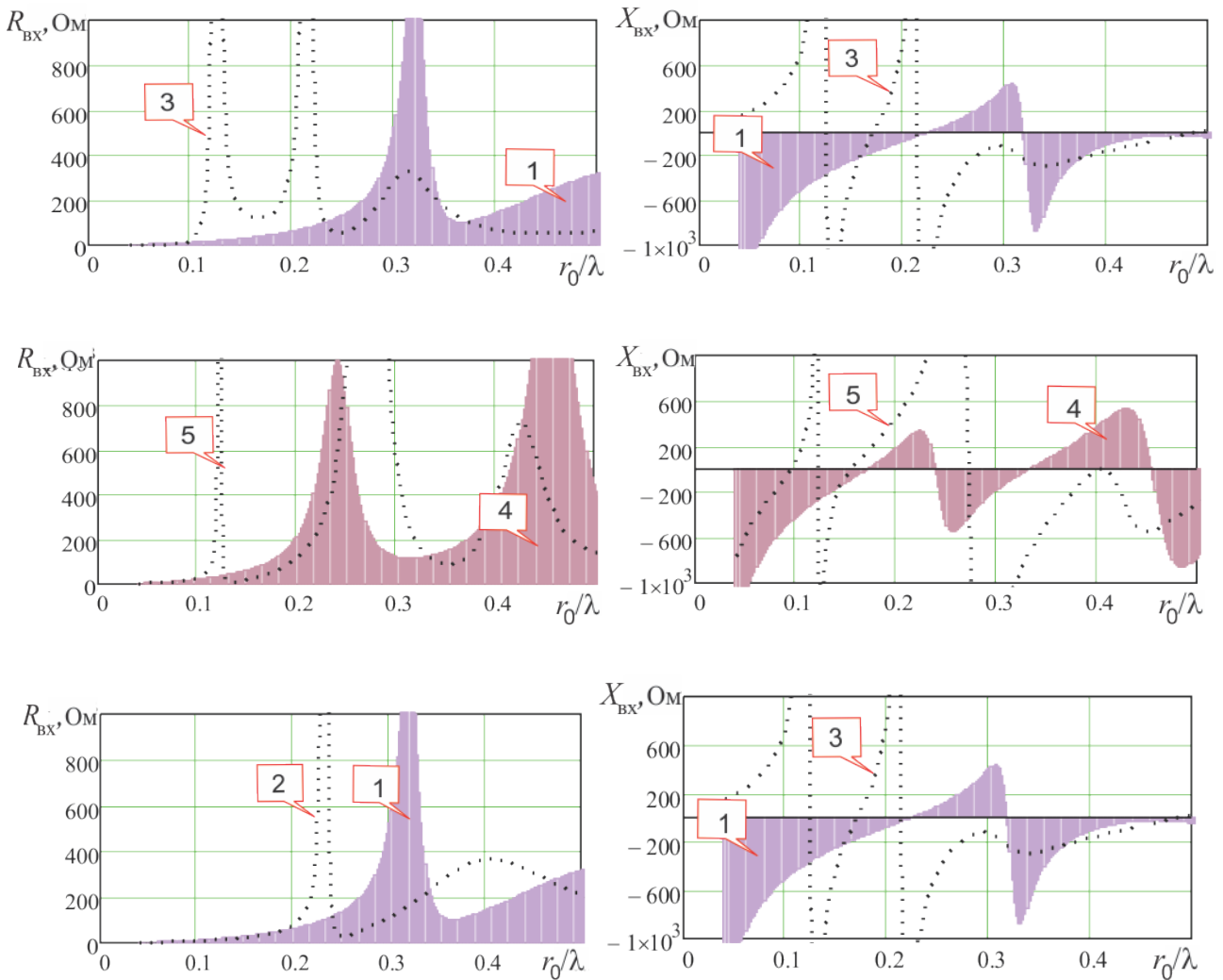


Рисунок 6 – Частотные зависимости входного импеданса:
 1 – треугольная рамка (рис. 2, а); 2 – «триадо-фрактал» Коха (рис. 4, а);
 3 – «триадо-фрактал» Пеано (рис. 4, б); 4 – круговая рамка (рис. 2, б);
 5 – круговой «триадо-фрактал» (рис. 4, в), $l = 0,025L_0$.

Таблица 1 – Параметры антенных элементов (возбуждение в трех точках)

| Антенный элемент | k_λ | $R_{\text{вх}}$ | $X_{\text{вх}}$ | КНД | Источники | |
|---|-------------|-----------------|-----------------|------|-----------|---------------------------------|
| | | | | | Кол-во | Сдвиг фаз |
| Треугольная рамка | 1,1 | 90 | 0 | 3,15 | Кол-во | Сдвиг фаз |
| Круговая рамка | 1,47 | 100 | 0 | 3,7 | 3 | $0^\circ; 120^\circ; 240^\circ$ |
| «Триадо-фрактал» Коха | 1,38 | 65 | 0 | 2,75 | 3 | $0^\circ; 120^\circ; 240^\circ$ |
| «Триадо-фрактал» Пеано ($h/b = 0,5$) | 1,41 | 50 | 0 | 2,55 | 3 | $0^\circ; 120^\circ; 240^\circ$ |
| Круговой «триадо-фрактал» ($r_1/r_0 = 0,45$) | 2,66 | 25 | 0 | 2,1 | 3 | $0^\circ; 120^\circ; 240^\circ$ |
| Турникет | 1,05 | 73 | 0 | 2,15 | 2 | $0^\circ; 90^\circ$ |

Из результатов, приведенных в табл. 1, видно, что в сравнении с широко применяемым на практике турникетным излучателем даже тривиальные рамки имеют определенные преимущества – для них и резонансная длина волны и КНД несколько больше.

Еще более интересными являются особенности, которые иллюстрируют графики и данные из табл. 1, характерные для префрактальных антенных элементов:

1) «неординарность» формы фрактальных излучателей в сравнении с прямолинейными диполями (или тривиальными рамками), является причиной возникновения дополнительных резонансных частот;

2) увеличение периметра фрактальной антенны (по сравнению с инициатором) ведет к увеличению резонансной длины волны, вследствие чего k_λ возрастает;

3) сближение точек возбуждения приводит к снижению величины $R_{\text{вх}}$ в области резонанса.

На рис. 7, где изображены зависимости входного импеданса антенных элементов при возбуждении в четырех точках, наблюдаются закономерности, аналогичные рассмотренным ранее:

1) наличие дополнительного количества резонансных точек;

2) возрастание максимальной резонансной длины волны;

3) снижение величины $R_{\text{вх}}$ в области резонанса.

В табл. 2 сведены параметры антенных элементов и, для сравнения, даны аналогичные параметры двухзаходной архимедовой 5-витковой спирали противофазного возбуждения, причем для нее в качестве максимальной длины волны принято такое ее значение, превышение которого приводит к резкому спаду КНД спирали.

Таблица 2 – Параметры антенных элементов (возбуждение в четырех точках)

| Антенный элемент | k_λ | $R_{\text{вх}}$ | $X_{\text{вх}}$ | КНД | Источники | |
|---|-------------|-----------------|-----------------|------|-----------|---|
| | | | | | Кол-во | Сдвиг фаз |
| Квадратная рамка | 1,21 | 120 | 0 | 3,15 | 4 | $0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ |
| Круговая рамка | 1,47 | 60 | 0 | 3,7 | 4 | $0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ |
| «Кварто-фрактал» Коха | 1,47 | 40 | 0 | 3,0 | 4 | $0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ |
| «Кварто-фрактал» Пеано ($h/b = 0,95$) | 2,53 | 25 | 0 | 2,6 | 4 | $0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ |
| Круговой «кварто-фрактал» ($r_1/r_0 = 0,33$) | 2,27 | 25 | 0 | 2,3 | 4 | $0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$ |
| <i>Спираль</i> | 1,15 | 240 | 0 | 3,7 | 1 | – |

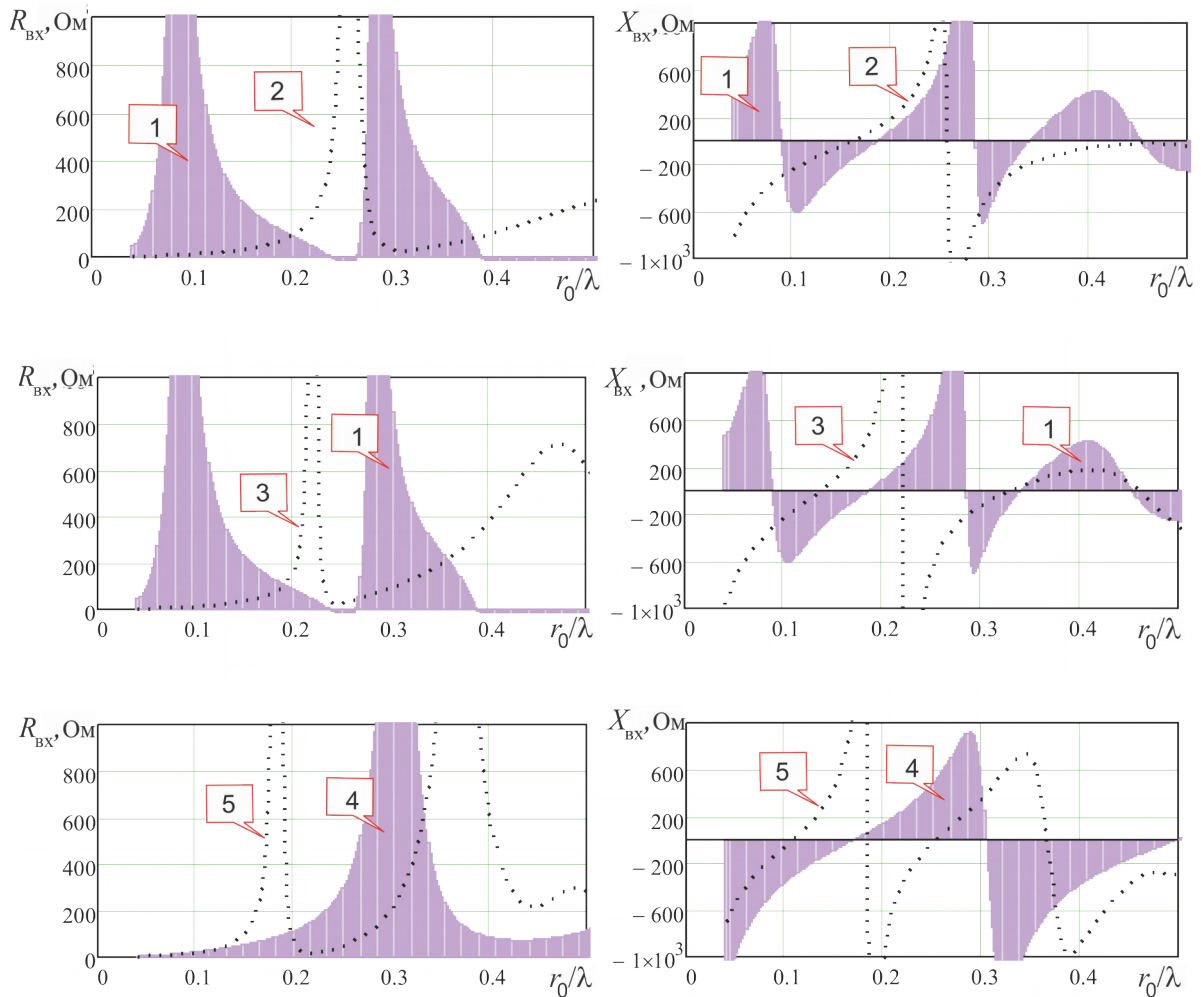


Рисунок 7 – Частотные зависимости входного импеданса:

- 1 – квадратная рамка (рис. 2, *в*); 2 – «кварто-фрактал» Коха (рис. 5, *а*);
- 3 – «кварто-фрактал» Пеано (рис. 5, *б*); 4 – круговая рамка (рис 2, *б*);
- 5 – круговой «кварто-фрактал» (рис. 5, *в*), $l = 0,025L_0$.

В целом результаты, представленные в табл. 1 и 2, поможет оценить диаграмма, изображенная на рис. 8, *а*. Видно, что максимальное увеличение резонансной длины волны имеет место для префрактальных антенных элементов, в особенности для сформированных на основе фракталов Пеано и кольцевых фракталов. Следовательно, такие конструкции дают возможность построения антенн круговой поляризации, максимальный размер которых может быть примерно в два раза меньше классических турникетных и спиральных антенн.

Следует учитывать, что площади треугольных и квадратных инициаторов фракталов S_ϕ меньше площади описывающей их окружности S_0 . С этой целью введем коэффициент $k_s = S_0 / S_\phi$, учитывающий «заполнение» пространства. Результирующий эффект можно охарактеризовать произведением $k_\lambda k_s$, как показано на рис. 8, *б*.

Приведенные диаграммы свидетельствуют о том, что наибольшей эффективностью характеризуются антенные элементы на основе фракталов Коха и Пеано квадратной формы, «использующих» пространство более экономно. В этом отношении круговые фракталы и спираль заметно уступают им.

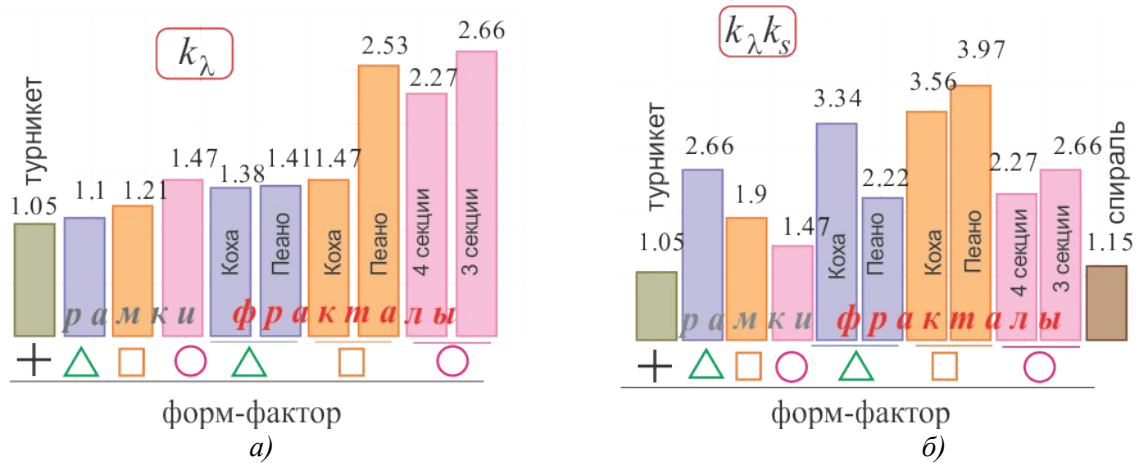


Рисунок 8 – Сравнение параметров антенных элементов различной формы

Причем спиральный антенный элемент, без сомнения обладая среди всех рассмотренных наибольшей широкополосностью и практически оптимально «заполняя» внутреннее пространство описанной окружности, в значительной степени уступает большинству из них по эффективности «использования» этого пространства.

В процессе численного моделирования установлено, что путем выбора формы и соотношения соответственных размеров инициатора и генератора префракталов можно в определенных пределах менять не только положение резонансных точек, но и величину входного импеданса.

Коэффициент отражения. Этот параметр в наибольшей степени характеризует частотные свойства малоразмерных антенных элементов, иллюстрируя возможности согласования антенн при нагрузке на активное сопротивление $R_n = R_{вх}$. На рис. 8 показаны частотные зависимости модуля коэффициента отражения $|s_{11}|$. Условные обозначения и параметры, соответствующие исследуемым антенным элементам, приведены далее в табл. 3.

На рис. 9 можно наблюдать «кратные» резонансы, характерные для простых рамок (кривые 1 и 4), причем с увеличением резонансной частоты значение $R_{вх}$ постепенно растет и, вследствие рассогласования, отражения от входа антенны в области повторных резонансов возрастают.

Для фрактальных антенных элементов резонансные частоты уже нельзя назвать «кратными» (см., например, кривые 8 и 9), при этом значение $R_{вх}$, как и в случае простых рамок, возрастает с ростом резонансной частоты.

Таблица 3 – Параметры графиков, изображенных на рис. 9

| Особенности возбуждения | | | | | |
|-------------------------|---------------------------|------------|------------------|---------------------------|------------|
| Три источника | | | Четыре источника | | |
| Номер кривой | Форм-фактор | R_n (Ом) | Номер кривой | Форм-фактор | R_n (Ом) |
| 1 | Треугольная рамка | 90 | 4 | Квадратная рамка | 120 |
| 2 | «Триадо-фрактал» Коха | 65 | 5 | «Кварто-фрактал» Коха | 40 |
| 3 | «Триадо-фрактал» Пеано | 50 | 6 | «Кварто-фрактал» Пеано | 25 |
| 7 | Круговая рамка | 100 | 9 | Круговая рамка | 60 |
| 8 | Круговой «триадо-фрактал» | 25 | 10 | Круговой «кварто-фрактал» | 25 |

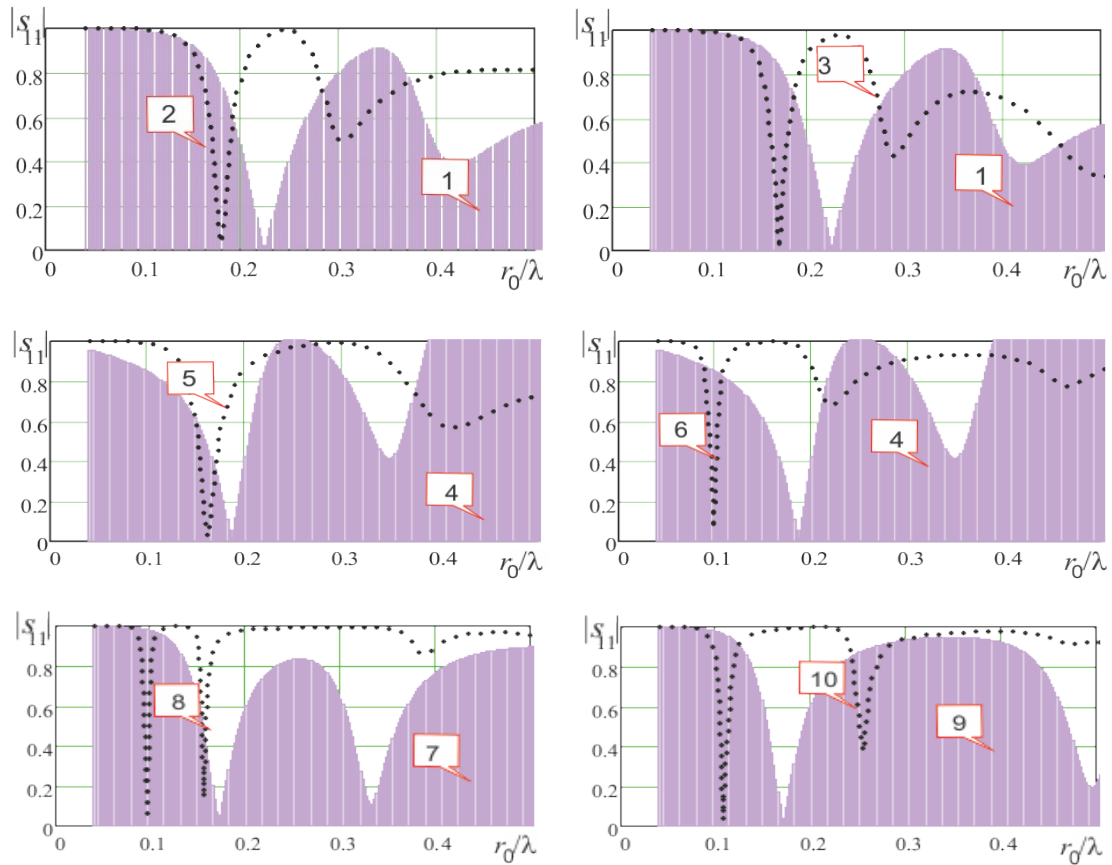


Рисунок 9 – Частотные зависимости модуля коэффициента отражения

Диаграммы направленности (ДН). Рассмотренные антенны являются слабонаправленными, все они имеют малые по сравнению с длиной волны размеры.

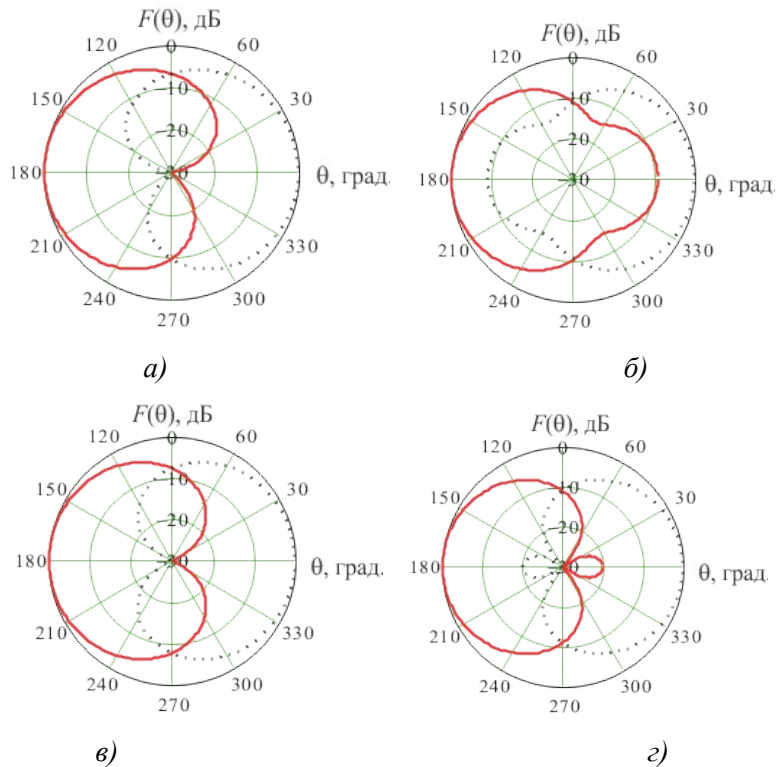


Рисунок 10 – Диаграммы направленности малоразмерных антенн: а – рамка, «триадо-фракталы» Коха и Пеано; б – квадратная рамка; в – «кварто-фракталы» Коха и Пеано; г – архимедова спираль

Несмотря на то, что направленные свойства малоразмерных антенн менее важны для практических приложений, здесь тоже можно отметить характерные особенности. Это иллюстрируют диаграммы направленности, изображенные на рис. 9, которые рассчитывались на резонансной частоте, соответствовавшей каждой антенне.

На этих диаграммах сплошная и пунктирная линии соответствуют правой и левой круговой поляризации, а угол Θ отсчитывается от нормали к плоскости, в которой лежит антенный элемент. Все рассмотренные типы антенных элементов реализуют однонаправленное излучение круговой поляризации соответствующего направления вращения, а ширина главного лепестка ДН отличается незначительно.

Заметна асимметрия ДН антенных элементов при трехточечном возбуждении и повышенный уровень заднего лепестка для квадратной рамки и спирали. В то же время при четырехточечном возбуждении антенные элементы на основе фракталов фон Кох, Пеано, а также кругового фрактала характеризуются симметричной ДН и отсутствием заднего лепестка.

Поляризационные свойства. Поляризационные свойства любой антенны можно охарактеризовать поляризационной ДН, то есть зависимостью коэффициента эллиптичности k_{Θ} (отношения малой и большой полуосей поляризационного эллипса) от координатного угла. Такие диаграммы, рассчитанные на резонансной частоте каждой антенны (а для спирали на низшей частоте рабочего диапазона), изображены на рис. 11.

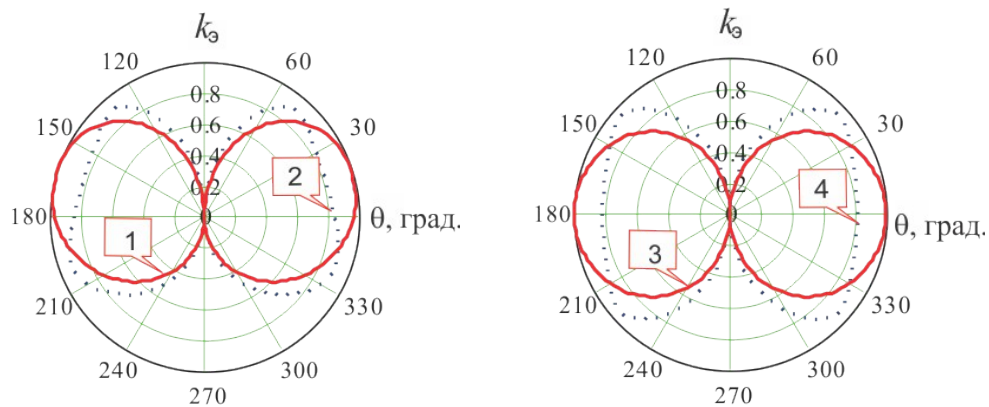


Рисунок 11 – Поляризационные ДН малоразмерных антенн:
 1 – «триадо-фрактал» Коха; 2 – «триадо-фрактал» Пеано;
 3 – «кварто-фрактал» Коха и Пеано; 4 – архимедова спираль

Видно, что антенны на основе «кварто-фракталов» Коха и Пеано имеют наиболее симметричную поляризационную ДН, а в сравнении со спиралью обеспечивают практически круговую поляризацию поля в направлениях близких к нормали.

В заключение нужно отметить, что в данной работе исследованы электродинамические характеристики малоразмерных плоских проволочных антенн круговой поляризации, выполненных в виде префрактальных элементов, и проведено сравнение их с аналогичными характеристиками излучателей в виде рамок разной формы, турникета и спирали.

При этом показано, что антенны круговой поляризации на основе «триадо-фракталов» и «кварто-фракталов» первого порядка итерации, в сравнении с обычными турникетными, рамочными и спиральными антеннами при четырехточечном возбуждении:

- 1) обладают существенно меньшими поперечными размерами;
- 2) более эффективно «используют» пространство, имея при этом практически такой же КНД;
- 3) обеспечивают возможность создания излучателей с произвольно выбранными несколькими резонансными частотами.

Основываясь на результатах данной работы можно указать в качестве возможных направлений дальнейших исследований такие, как, например, расширение рабочей полосы частот путем сочетания фрактальных конструкций более высоких порядков итерации и диэлектрических материалов. Интерес представляет также создание однонаправленных антенных элементов в виде решеток и сочетания подобных излучающих элементов с плоским экраном.

Література

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
2. Юрцев Ю.А. Спиральные антенны / Юрцев Ю.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. – М.: Сов. радио, 1974. – 223 с.
3. Слюсар В. И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн /Слюсар В.И. // Электроника НТБ. – 2007 – №. 5. – Режим доступа: www. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/593>.
4. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике: Современное состояние и развитие / Потапов А.А. // Журнал радиоэлектроники – 2010. – №1. – Режим доступа: www. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.html>.
5. Fractal antennas and fractal resonators. US Patent No.: US 76,750,856 B2 / Nathan Cohen filed: Jul. 17, 2007, date of patent: Jul. 6, 2010.
6. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы; пер. с англ. / Шредер М. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
7. Федер Е. Фракталы; пер. с англ. / Федер Е. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
8. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.
9. Жук М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С.Жук, Ю.Б. Молочков. – М. : Энергия , 1973. – 448 с.