

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-09>

УДК 537.86

**КВАЗИ-ФРАКТАЛЬНАЯ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНАЯ СТРУКТУРА,  
ВОЗБУЖДАЕМАЯ С ПОМОЩЬЮ ОТРЕЗКА НЕЭКРАНИРОВАННОЙ  
КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ****С.А. Погарский, А.В. Позняков***Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4**E-mail: spogarsky@gmail.com*

19 сентября 2018 г.

**Актуальность.** Развитие телекоммуникационных технологий и глобальный процесс внедрения беспроводных систем требует использование новых типов антенных систем. Особый интерес представляют миниатюрные и простые в изготовлении антенны. Микрополосковые антенны (МПА) являются наиболее перспективными в этом смысле, поскольку они при своей малогабаритности и небольшом весе могут работать в многочастотном режиме, имеют высокую степень интеграции с другими микрополосковыми схемами, быть излучающими элементами фазированных антенных решеток (ФАР).

**Цель работы.** Целью работы является моделирование электродинамических параметров сложнокомпозиционной квази-фрактальной излучающей структуры на основе микрополоскового монополя. Оптимизация параметров возбуждающего элемента в виде отрезка неэкранированного копланарного волновода.

**Материалы и методы.** Сложнокомпозиционная квази-фрактальная структура на основе микрополоскового монополя включает в себя диэлектрическую подложку, микрополосковый монополь с квази-фрактальной апертурой, отрезок неэкранированного копланарного волновода. Основой анализа является метод конечных элементов с привлечением метода интегральных уравнений для учета поведения электромагнитных полей на бесконечности.

**Результаты.** В рамках численного эксперимента проведен расчет спектральной характеристики антенны. Осуществлен сравнительный анализ спектральных характеристик канонического дискового микрополоскового резонатора, возбуждаемого отрезком микрополосковой линии, и канонического резонатора, возбуждаемого отрезком копланарной линии со спектром собственных колебаний квази-фрактальной антенны, возбуждаемой отрезком копланарного волновода. Исследовано влияние значения диэлектрической проницаемости подложки на частотные и энергетические характеристики излучающей структуры. Показано, что вариация значений диэлектрической проницаемости приводит к заметным изменениям в частотной характеристике лишь в высокочастотной полосе. При этом увеличение значений диэлектрической проницаемости приводит к сдвигу минимумов частотной характеристики в более низкочастотную область рассматриваемого диапазона. Установлено, что излучающая структура является двухдиапазонной, причем ширина рабочих полос частот оказалась различной. Ширина низкочастотной

полосы по уровню  $|S_{11}| \leq 10$  дБ составляет  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.95$ , а ширина высокочастотной полосы составляет

$\frac{\Delta f}{f_c} = 0.315$ . Проведено численное моделирование энергетических характеристик в виде диаграмм

направленности в угломестной плоскости при фиксированном азимутальном угле на различных частотах. Указаны возможные методы коррекции параметров излучающей структуры с целью улучшения энергетических характеристик и согласования с внешними цепями.

**Выводы.** В ходе численного эксперимента установлено, что предложенная сложнокомпозиционная квази-фрактальная излучающая структура на основе микрополоскового монополя может обеспечивать эффективное излучение с приемлемым уровнем паразитных потерь. При этом структура может обеспечивать приемлемый уровень согласования с внешними цепями в достаточно широкой полосе. Показана возможность формирования излучаемых полей с заданными характеристиками в двух рабочих полосах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** аксиально-симметричная структура, квази-фрактал, копланарная линия, согласование, диаграмма направленности

**QUASI-FRACTAL AXIAL-SYMMETRIC STRUCTURE FEEDED BY  
SEGMENT OF NONGROUNDED COPLANAR LINE****S.A.Pogarsky, A.V.Poznyakov***V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

**Background.** Developments in telecommunication technologies and global implementation of wireless systems calls for new types of antenna systems. Microstrip antennas look the most promising in this field since they possess

multiband operation capability with small dimensions and low weight, high degree of integration with other microstrip circuits and can be used as elements of phased antenna arrays.

**Objectives.** The goal of this paper was to simulate electrodynamic characteristics of quasi-fractal radiating structure with complex composition based on a microstrip monopole, to optimize parameters of the excitation element in the form of unshielded coplanar waveguide segment.

**Materials and methods.** Quasi-fractal radiating structure with complex composition based on a microstrip monopole consists of dielectric substrate, microstrip monopole with quasi-fractal aperture, an unshielded coplanar waveguide segment. The analysis was based on the Finite Elements Method with Integral Equation Method used to account for electromagnetic fields at infinity.

**Results.** Within scope of numerical simulation spectral characteristics of the antenna were analyzed. Comparative analysis of spectral characteristics of canonical disk resonator excited with a microstrip line segment and canonical disk resonator excited with a segment of a coplanar line with eigenmode spectrum of a quasi-fractal excited with a segment of a coplanar waveguide was performed. Influence of dielectric substrate permittivity value on frequency and power characteristics of the radiating structure was studied. It was shown that variations in dielectric permittivity value lead to significant changes of frequency response in the higher frequency band only, wherein increase of dielectric permittivity value leads to a shift of frequency response minima towards lower frequencies of the given frequency band. It was determined that radiating structure is dualband and bandwidth of operating bands was different. Lower frequency bandwidth on  $|S_{11}| \leq 10$  dB was  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.95$ , and higher frequency bandwidth was

$\frac{\Delta f}{f_c} = 0.315$ . Numerical simulation of power characteristics was performed with the radiation patterns presented as

elevation patterns with fixed azimuthal angle at various frequencies. Possible methods of radiating structure parameters correction with the goal of improving power characteristics and external circuits matching were given.

**Conclusions.** Within scope of numerical simulation was determined that the given quasi-fractal radiating structure with complex composition based on a microstrip monopole can provide effective radiation with acceptable parasitic loss rate. The structure can provide acceptable level of external circuits matching in wide enough frequency band. The ability to form radiated fields with given characteristics in two operating bands.

**KEY WORDS:** axial-symmetric structure, quasi-fractal, coplanar line, matching, pattern characteristic

## КВАЗИ-ФРАКТАЛЬНА АКсіАЛЬНО-СИМЕТРИЧНА СТРУКТУРА, ЯКА ЗБУДЖУЄТЬСЯ ВІДРІЗКОМ КОПЛАНАРНОЇ ЛІНІЇ

С.О. Погарський, А.В. Позняков

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

**Актуальність.** Розвиток телекомунікаційних технологій і глобальний процес впровадження бездротових систем вимагає використання нових типів антенних систем. Особливий інтерес представляють мініатюрні та прості у виготовленні антени. Мікросмужкові антени (МСА) є найбільш перспективними в цьому сенсі, оскільки вони при своїй малогабаритності та невеликій вазі можуть працювати в багаточастотному режимі, мають високу ступінь інтеграції з іншими мікросмужковими схемами, бути випромінюючими елементами фазованих антенних решіток (ФАР).

**Мета роботи.** Метою роботи є моделювання електродинамічних параметрів складнокомпозиційної квазі-фрактальної випромінюючої структури на основі мікросмужкового монополя. Оптимізація параметрів збуджуючого елемента у вигляді відрізка неекранованого копланарного хвилеводу.

**Матеріали та методи.** Складнокомпозиційна квазі-фрактальна структура на основі мікросмужкового монополя включає в себе діелектричну підкладку, мікросмужковий монополь з квазі-фрактальною апертурою, відрізок неекранованого копланарного хвилеводу. Основою аналізу є метод кінцевих елементів із залученням методу інтегральних рівнянь для обліку поведінки електромагнітних полів на нескінченності.

**Результати.** В рамках чисельного експерименту здійснено розрахунок спектральних характеристик антени. Здійснено порівняльний аналіз спектральних характеристик канонічного дискового мікросмужкового резонатора, що збуджується відрізком мікросмужкової лінії, і канонічного резонатора, що збуджується відрізком копланарної лінії зі спектром власних коливань квазі-фрактальної антени, яка збуджується відрізком копланарного хвилеводу. Досліджено вплив значення діелектричної проникності підкладки на частотні й енергетичні характеристики випромінюючої структури. Показано, що варіація значень діелектричної проникності призводить до помітних змін в частотній характеристиці лише в високочастотній смузі. При цьому збільшення значень діелектричної проникності призводить до зрушення мінімумів частотної характеристики в більш низькочастотну область розглядаемого діапазону. Встановлено, що випромінююча структура є двудиапазонною, причому ширина робочих смуг частот виявилася різною. Ширина низькочастотної смуги за рівнем  $|S_{11}| \leq 10$  дБ становить  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.95$ , а ширина

високочастотної смуги становить  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.315$ . Проведено чисельне моделювання енергетичних

характеристик у вигляді діаграм спрямованості в кутомісцевій площині при фіксованому азимутальному куті на різних частотах. Вказані можливі методи корекції параметрів випромінюючої структури з метою поліпшення енергетичних характеристик й узгодження із зовнішніми ланцюгами.

**Висновки.** В ході чисельного експерименту встановлено, що запропонована складнокомпозиційна квазі-фрактальна випромінююча структура на основі мікросмужкового монополя може забезпечувати ефективне випромінювання з прийнятним рівнем паразитних втрат. При цьому структура може забезпечувати прийнятний рівень узгодження із зовнішніми ланцюгами в досить широкій смузі. Показана можливість формування випромінюваних полів із заданими характеристиками в двох робочих смугах.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** аксиально-симметрична структура, квазі-фрактал, копланарна лінія, узгодження, діаграма спрямованості

## ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие телекоммуникационных технологий и глобальный процесс внедрения беспроводных систем невозможно представить без применения новых типов антенных систем. В связи с этим возник спрос на миниатюрные и простые в изготовлении антенны. Ими без сомнения являются микрополосковые антенны (МПА), которые при своей малогабаритности и небольшом весе могут работать в многочастотном режиме, имеют высокую степень интеграции с другими микрополосковыми схемами, быть излучающими элементами ФАР. Область применения МПА необычайно широка: системы GPS/GLONASS, технологии WI-FI, GSM и др. [1]. Наибольшее распространение получили МПА различных конфигураций в технологиях RFID (Radio Frequency Identification) [2], что позволило для радиочастотной идентификации создавать миниатюрные излучатели, геометрические размеры которых много меньше излучаемых или принимаемых длин волн. Также следует учесть возможность размещать микрополосковые антенны на движущихся объектах: автомобилях, морских судах, самолетах, ракетах и др., не нарушая их аэродинамику. МПА могут обладать свойством высокой степени воспроизводимости параметров, а также различными видами поляризации излучаемого электромагнитного поля.

Однако МПА имеют наряду с достоинствами и свои недостатки такие как:

- относительно узкая рабочая полоса частот;
- сравнительно низкий КПД;
- возможность существования вырождение типов колебаний в спектре у аксиально-симметричных структур;
- потери в диэлектрических средах и проводниках, потери на излучение;
- эффекты, связанные с возникновением в структуре поверхностных волн.

Все эти причины приводят к снижению уровня энергетических характеристик МПА даже при выполнении других жестких требований, в том числе при использовании тонких диэлектрических подложек [3].

Известны различные методы компенсации недостатков МПА на основе аксиально-симметричных структур. Среди них можно обозначить следующие.

Многорезонансный метод - заключается в возбуждении пассивных (паразитных) излучателей относительно активного, которые возбуждаются от подводимой линии питания, и, за счет появления второго резонанса, образуется общая широкая полоса рабочих частот. Однако, при добавлении паразитного излучателя диаграмма направленности искажается за счет фазовой задержки паразитных излучателей и приобретает уже несимметричный вид, что является неприемлемым для большинства применений микрополосковых антенн.

Метод создания многослойных структур – данный метод предполагает наличие нескольких излучателей, каждый из которых возбуждается различным способом. Каждый из излучателей может располагаться на различных уровнях диэлектрических слоев. Для увеличения широкополосности излучающей структуры излучающие апертуры могут быть разнесены в пространстве, между ними могут быть размещены дополнительные элементы в виде диэлектрических слоев и др. [4]

По отношению к аксиально-симметричным структурам существуют и некоторые специфические методы преодоления свойственных им недостатков: например, изменение топологии излучающей апертуры, введение в структуру различного типа неоднородностей (например, щелевых), введение дополнительных элементов, воздействующих на фазовые центры колебаний (например, закорачивающих элементов на заземленную плоскость) и ряд других. Определенное влияние на характеристики структуры имеет способ возбуждения МПА.

В настоящей работе предложена конструкция и проведен анализ квази-фрактальной аксиально-симметричной структуры на основе микрополоскового монополя, возбуждаемой с помощью отрезка копланарной линии. Исследовано влияние значения относительной диэлектрической проницаемости подложки на параметры излучающей структуры.

### ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Будем исследовать излучающую структуру на основе квази-фрактальной микрополосковой структуры, топология и поперечное сечение которой представлены на Рис. 1.

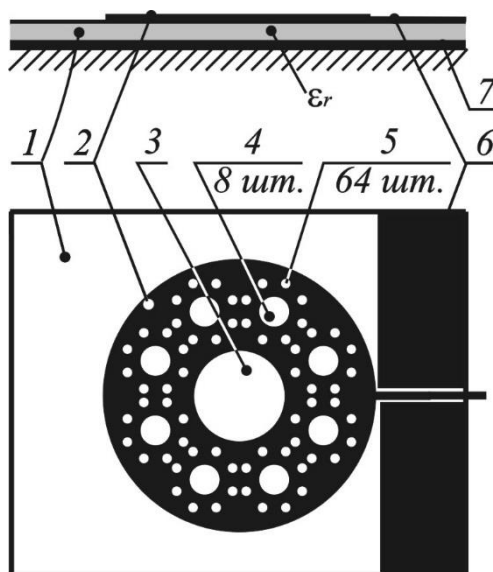


Рис. 1. Топология и сечение исследуемой структуры.

На Рис. 1 использованы следующие обозначения: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – базовый микрополосковый диск; 3 – элементы первой итерации; 4 – элементы второй итерации; 5 – элементы третьей итерации; 6 – элементы копланарной линии; 7 – заземленное основание.

Базовым элементом являлся микрополосковый диск. В диске выполнены дисковые неоднородности щелевого типа различного диаметра с коэффициентом скейлинга  $\xi = 3$  и расположенные аксиально-симметрично относительно центра базового диска. Для возбуждения МПА использовался отрезок копланарной линии. Геометрические размеры основных элементов структуры были выбраны, исходя из потребностей работы излучающей структуры в максимально широкой полосе частот: диаметр базового микрополоскового диска – 35 мм, это значение характерно для низкочастотной части сантиметрового диапазона, в качестве диэлектрической подложки был выбран материал FLAN-3.8 с диэлектрической проницаемостью 3.8 и толщиной 0.5 мм. Геометрические размеры отрезка копланарного возбуждителя выбирались из условий максимально возможного согласования излучающего резонатора и внешних цепей.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Начальным этапом исследования явилось изучение возбуждаемых спектров собственных колебаний в структуре. Этот элемент исследования является принципиальным по той причине, что дисковый резонатор и отрезок возбуждающего фидера представляют собой два резонатора, работающие при величине связи большей критической. При этом возможно возникновение паразитных резонансов и взаимное влияние (вплоть до проявления эффекта «затягивания частоты») [5].

На Рис.2 представлен спектр собственных мод канонического дискового резонатора, возбуждаемого отрезком микрополосковой линии. В спектре собственных колебаний такой структуры наблюдаются частотные области с вырожденными собственными модами: вблизи частот  $F = 6$  ГГц,  $F = 7$  ГГц,  $F = 11$  ГГц и др. С ростом частоты происходит сгущение спектра. Сгущение спектра и наличие вырожденных типов приводит к поляризационной нестабильности возбуждаемых мод.

Спектр канонического дискового резонатора с возбуждением отрезком неэкранированной копланарной линии приведен на Рис.3. Сравнение спектральных характеристик показывает существенные изменения в спектральном составе. В низкочастотной области происходит существенное разрежение спектра. Практически во всем рассматриваемом частотном диапазоне спектральные линии расположены относительно равномерно на частотной оси. И лишь в частотной области  $F > 14$  ГГц происходит определенное сгущение спектра. Характерной является область вблизи частоты  $F = 16$  ГГц. В этой области происходит существенное сближение спектральных линий (но не наступает вырождение!). Расстояние на частотной оси оказывается слишком незначительным, поэтому на графическом представлении на рис. 3 спектральные линии сливаются.

При использовании отрезка незранированной копланарной линии передачи в качестве фидерного элемента достаточно принципиально изменяется спектральный состав возбуждаемых типов колебаний. Спектральная характеристика приведена на Рис. 4. Анализ характеристики показывает, что в диапазоне от 2 до 4.5 ГГц присутствует только один тип колебания. В диапазоне от 4.5 до 8 ГГц произошло существенное разрежение спектра. В частотном диапазоне выше 8 ГГц заметных изменений в спектральных характеристиках канонического резонатора и квази-фрактального резонатора при возбуждении отрезком копланарной линией не происходит. Происходит лишь сдвиг характеристики в высокочастотную область на 0.29 ГГц.

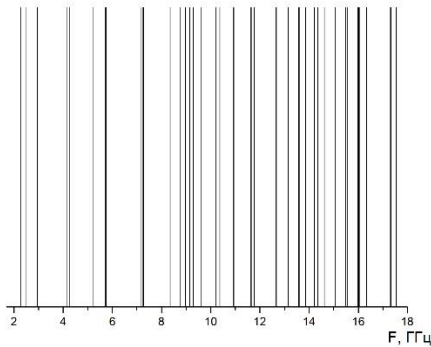


Рис. 2. Спектр собственных колебаний канонического дискового резонатора с возбуждением отрезком микрополосковой линии.

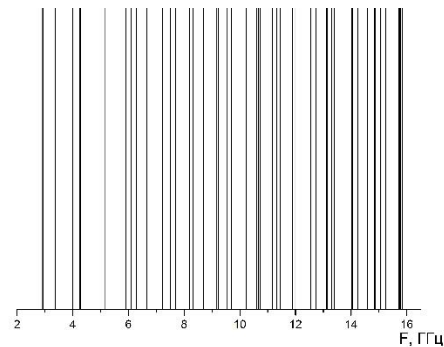


Рис. 3. Спектр собственных колебаний канонического дискового резонатора с возбуждением отрезком копланарной линии.

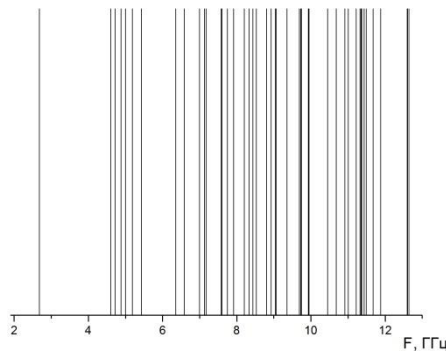


Рис. 4. Спектр собственных колебаний квази-фрактальной антенны с возбуждением отрезком копланарной линии.

На Рис. 5 показана зависимость модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  классического дискового излучателя, возбуждаемого с помощью отрезка незранированного копланарного волновода. Вид характеристики указывает на тот факт, что при возбуждении канонического дискового монополя с помощью отрезка копланарной линии излучающая структура становится однодиапазонной (в отличие от структуры, возбуждаемой с помощью классического способа возбуждения с помощью отрезка МПЛ [5]).

Относительная рабочая полоса составляет  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.398$ , что оказывается существенно более широкой по сравнению со случаем возбуждения с помощью отрезка МПЛ. Минимум модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  наблюдается на частоте  $F=3.87$  ГГц, что эквивалентно  $KCBH=1.162$ . Данная частота практически совпадает с частотой спектральной линии одной из собственных мод классического дискового излучателя. Исходя из этого, мы можем предположить, что на частотах близких к минимуму коэффициента отражения может быть обнаружено эффективное излучение.

На Рис. 6 представлена зависимость модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  сложнопозиционной квази-фрактальной антенны от частоты. В характеристике наблюдаются две рабочих полосы частот. При этом минимумы модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  наблюдались на частотах  $F = 3.56$  ГГц и  $F = 13.12$  ГГц, что эквивалентно значениям  $KCBH = 1.063$  и  $KCBH = 1.069$ , соответственно.

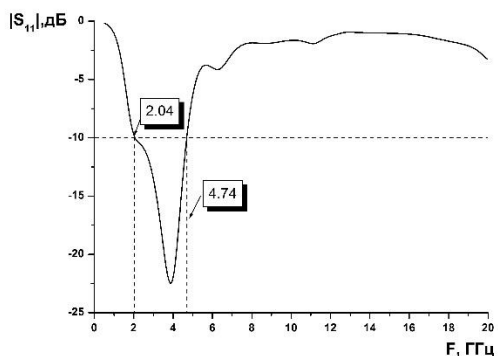


Рис 5. Зависимость модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  канонического дискового излучателя с отрезком копланарной линии от частоты.

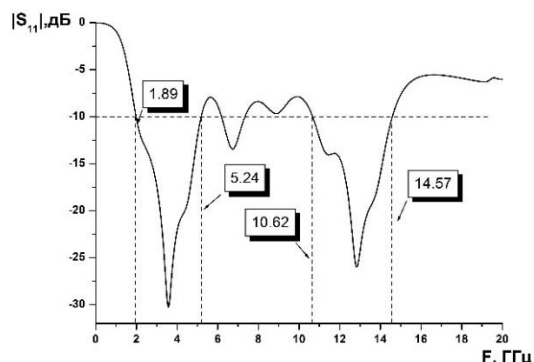


Рис.6. Зависимость модуля  $|S_{11}|$  квази-фрактальной антенны с отрезком копланарной линии от частоты.

При этом относительная ширина низкочастотной области составляет  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.47$  (полоса расширилась по сравнению с шириной полосы для канонического дискового резонатора), а относительная высокочастотная рабочая полоса частот составляет  $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.16$ . При этом необходимо отметить, что полосы частот в абсолютных значениях в обоих случаях составляют примерно 4 ГГц (а в случае канонического резонатора – не превышают 2 ГГц). Такая полоса частот обеспечивает передачу сверхширокополосных сигналов. Необходимо также отметить, что в случае квази-фрактальной топологии излучающей апертуры возрастает абсолютный минимум по сравнению с каноническим резонатором, что свидетельствует о повышении уровня излучаемой энергии.

На Рис.7 и 8 показаны зависимости величин КСВН для классического микрополоскового излучателя, возбуждаемого отрезком копланарного волновода, и излучающей апертуры на основе микрополоскового монополя с элементами фрактальности.

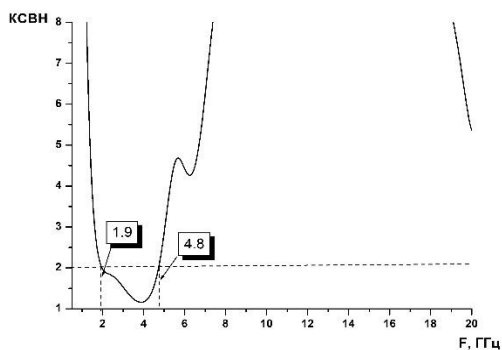


Рис. 7. Зависимость КСВН канонического дискового резонатора, возбуждаемого отрезком копланарной линии.

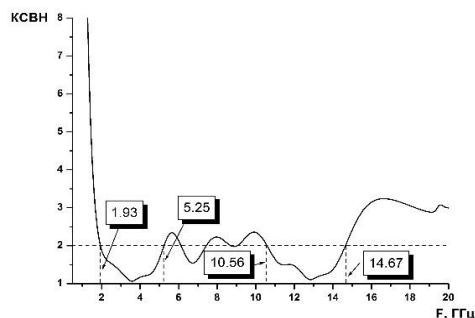


Рис. 8. Зависимость КСВН квази-фрактальной апертуры, возбуждаемой отрезком копланарной линии.

Анализ зависимостей показывает, что канонический дисковый резонатор, возбуждаемый отрезком копланарного волновода, способен работать в относительно широкой, но при этом только в одной частотной полосе. Вне этой полосы значения КСВН оказываются существенными и не позволяют рассчитывать на эффективное излучение структуры. В случае квази-фрактальной излучающей апертуры в характеристике присутствуют две рабочие зоны (примерно одинаковой ширины порядка 5 ГГц). При этом вне рабочих зон колебания амплитуд значений КСВН не являются резкими, за исключением частот

меньших 2.5 ГГц. Эта частота является ближайшей к частоте первой спектральной линии в спектральной характеристике.

Небольшие вариации значений относительной диэлектрической проницаемости подложки в реальных устройствах являются достаточно частым явлением. Причинами могут быть как локальные отклонения, так и погрешности технологических процессов при изготовлении. Этот фактор, безусловно, необходимо учитывать при проектировании реальных устройств. На Рис. 9 представлены зависимости модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  от частоты при небольших вариациях значений относительной диэлектрической проницаемости (до 3% от заданного значения).

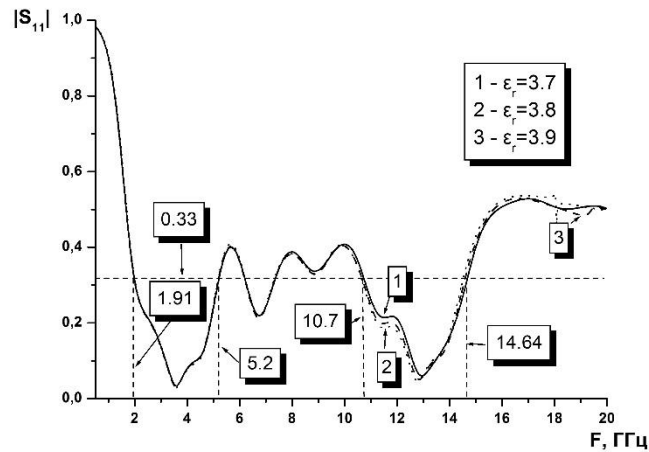


Рис. 9. Зависимость  $|S_{11}|$  от частоты при вариации  $\epsilon_r$ .

Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что при выбранном способе возбуждения квази-фрактальной структуры (с помощью отрезка копланарной линии)  $|S_{11}|$  достаточно слабо зависит от малых вариаций значения  $\epsilon_r$ . Это влияние оказывается заметным лишь в высокочастотной рабочей области.

На Рис 10, 11 и 12 представлены энергетические характеристики структуры в виде диаграмм направленности в угломерной плоскости при фиксированном азимутальном угле  $\varphi = 90^\circ$ . Выбор частот обусловлен двумя факторами: для первых двух частот – это минимум  $|S_{11}|$ , для третьей частоты – это центральная частота рабочего поддиапазона.

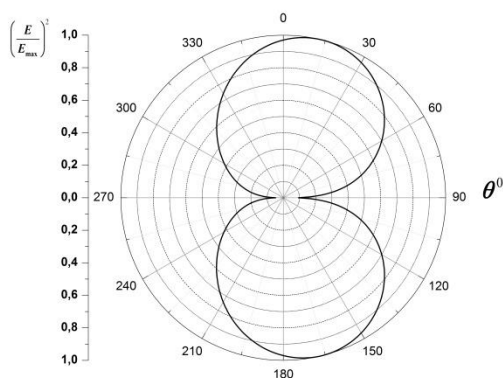


Рис. 10. Диаграмма направленности на частоте  $F = 3.56$  ГГц.

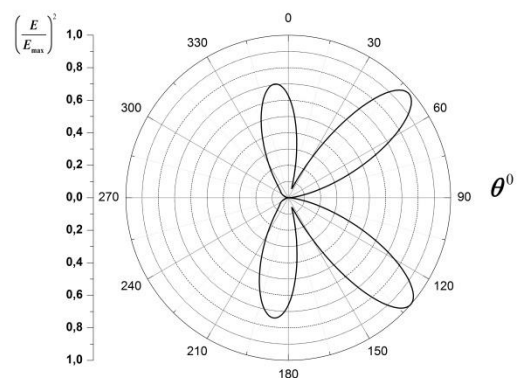


Рис. 11. Диаграмма направленности на частоте  $F = 10$  ГГц.

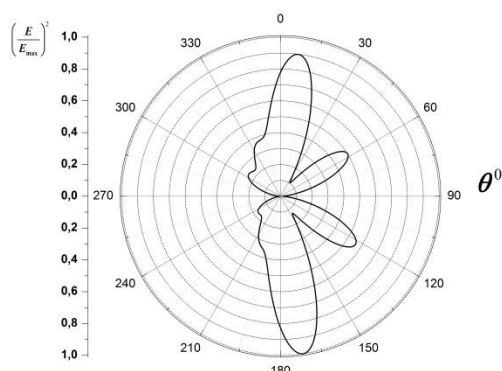


Рис. 12. Диаграмма направленности на частоте  $F = 13.12$  ГГц

Анализ приведенных диаграмм показывает, что на всех частотах диаграммы в угломерной плоскости принципиально остаются двухлепестковыми. Все диаграммы нормированы на глобальный максимум для каждой частоты. Причем с ростом частоты диаграммы модифицируются: появляются дополнительные интерференционные лепестки, а ширина главных лепестков сужается. Уровень лепестков со стороны диэлектрической подложки оказывается более высоким. Этот факт объясняется влиянием диэлектрика (эффект втягивания поля в среду с большим значением относительной диэлектрической проницаемости).

### ВЫВОДЫ


В работе предложена конструкция сложноконструкционной антенны на основе микрополоскового монополя с квази-фрактальной апертурой. В ходе численных экспериментов исследованы спектральные характеристики структуры при использовании отрезка копланарной линии в качестве возбуждителя. Установлена возможная степень согласования структуры с внешними цепями. Показано, что такая структура может обеспечивать эффективное излучение с приемлемым уровнем паразитных потерь. Выявлена возможность формирования излучаемых полей с заданными характеристиками в двух рабочих полосах. Выбранный способ возбуждения продемонстрировал существенные преимущества по сравнению со способом возбуждения отрезком микрополосковой линии.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы, которая финансируется за счет средств государственного бюджета Министерством образования и науки Украины (номер бюджетной темы 0119U002535).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

### Authors' ORCID ID

Pogarsky, Sergey A.  <http://orcid.org/0000-0003-0833-1421>

Poznyakov Artem  <https://orcid.org/0000-0002-8485-5342>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гафаров Е.Р. Антенна ГЛОНАСС/GPS с частотно-селективной поверхностью / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // Известия высших учебных заведений. Физика. Ежемесячный научный журнал (Томск). - 2010. - Т. 53, № 9/2. - С. 60-61
2. Елизаров А.А. Исследование микрополосковой антенны для RFID-технологии на круговой меандр-линии / А.А. Елизаров, А. Н. Нестеренко, Э. А Закирова, А.С.Кухаренко // Т-Comm. 2017. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mikropoloskovoy-antenny-dlya-rfid-tehnologii-na-krugovoy-meandr-linii> (дата обращения: 02.06.2019).
3. Панченко Б.А. Микрополосковые антенны. / Б.А Панченко. Е. И. Нефёдов //М.: Радио и связь, 1986, 76 с.;
4. Махалов С.П. Широкополосные микрополосковые антенны /С.П. Махалов // Екатеринбург 2015. С. 8-10.
5. Mayboroda D.V. The Quasi-Fractal Microstrip Antenna. /D.V. Mayboroda, S.A. Pogarsky, A.V. Poznyakov, E.V. Shcherbatiuk// Proceedings of the UWBUSIS'2018, p. 349-352.