

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.3.091.22

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-3

Исследование фрактальных патч-антенн в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах частот

Р. А. Браже¹, Е. Ю. Лебедев²

^{1,2}Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

¹brazhe@ulstu.ru, ²lebedev.egor@ulsk173.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В последние годы наблюдается информационный бум вокруг фрактальных антенн, предназначенных для систем беспроводной связи на самых разных частотах. Однако среди специалистов пока нет однозначного мнения о том, обладают ли такие антенны лучшими характеристиками, чем обычные, канонические антенны. В связи с этим целью настоящей статьи является исследование фрактальных патч-антенн в представляющих наибольший практический интерес современных системах связи на гигагерцовых и терагерцовых частотах. *Материалы и методы.* Рассматриваются две одинаковые по форме монополярные фрактальные патч-антенны типа «ковёр Серпинского»: гигагерцовая и терагерцовая. Исследуются следующие характеристики обеих антенн: частотные зависимости матрицы рассеяния, коэффициент стоячей волны напряжения, входного сопротивления и диаграммы направленности. Принимается во внимание, что в терагерцовом диапазоне приходится учитывать факт возбуждения в патче плазмон-поляритонов, обладающих сильно выраженными дисперсионными свойствами. Моделирование осуществлялось в программе CST Microwave Studio отдельно для исходной треугольной канонической антенны и трех ее фрактальных итераций. *Результаты.* Показано, что фрактализация электромагнитной гигагерцовой антенны не дает ощутимых преимуществ по сравнению с исходной нефрактальной антенной ни по количеству рабочих частот, ни по качеству диаграммы направленности, а по ряду параметров эта фрактализация даже ухудшает ситуацию. Напротив, в случае плазмон-поляритонной терагерцовой антенны вследствие дисперсионных свойств плазмон-поляритонов удается повысить и количество полос пропускания антенны, и интенсивность главного лепестка диаграммы направленности, и его угловую ширину. *Выводы.* Часто рекламируемые преимущества фрактальных антенн на частотах вплоть до гигагерцовых на деле являются лишь данью моде. В то же время в случае плазмон-поляритонных антенн терагерцового диапазона их фрактализация позволяет реализовать новые возможности в смысле многополосности и эффективности управления характеристиками.

Ключевые слова: фрактальные патч-антенны, гигагерцы, терагерцы, характеристики, эффективность

Для цитирования: Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Исследование фрактальных патч-антенн в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах частот // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 29–40. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-3

Studying the fractal patch antennas in the gigahertz and terahertz frequency ranges

R.A. Brazhe¹, E.Yu. Lebedev²

^{1,2}Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

¹brazhe@ulstu.ru, ²lebedev.egor@ulsk173.ru

Abstract. *Background.* In recent years, there has been an information boom around fractal antennas designed for wireless communication systems at a wide variety of frequencies. However, there is still no clear opinion among experts on whether such antennas have better characteristics than conventional canonical antennas. In this regard, the purpose of this article is an investigation of fractal patch antennas in modern communication systems of the greatest practical interest at gigahertz and terahertz frequencies. *Materials and methods.* The paper considers two identical-shaped monopole fractal patch antennas of the “Sierpinski carpet” type: gigahertz and terahertz. The following characteristics of both antennas are investigated: frequency dependences of the scattering matrix, VSWR, input impedance and radiation pattern. It is taken into account that in the terahertz range it is necessary to take into account the fact that plasmon-polaritons with strongly pronounced dispersion properties are excited in the patch. The simulation was carried out in the CST Microwave Studio program separately for the initial triangular canonical antenna and its three fractal iterations. *Results.* It is shown that the fractalization of an electromagnetic GHz antenna does not provide tangible advantages over the original non-fractal antenna in terms of either the number of operating frequencies or the quality of the radiation pattern, and this fractalization even worsens the situation in a number of parameters. On the contrary, in the case of a plasmon-polariton THZ antenna, due to the dispersion properties of plasmon-polaritons, it is possible to increase both the number of antenna bandwidth, the intensity of the main lobe of the radiation pattern, and its angular width. *Conclusion.* The often advertised advantages of fractal antennas at frequencies up to gigahertz are actually just a fashion statement. At the same time, in the case of terahertz plasmon-polariton antennas, their fractalization makes it possible to realize new possibilities in terms of multiband and efficient control of characteristics.

Keywords: fractal patch antennas, gigahertz, terahertz, characteristics, efficiency

For citation: Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Studying the fractal patch antennas in the gigahertz and terahertz frequency ranges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):29–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-3

Введение

В последние годы наблюдается всплеск числа публикаций, посвященных разработке и математическому моделированию характеристик фрактальных патч-антенн, предназначенных для систем беспроводной связи в различных частотных диапазонах [1–9]. Ряд исследователей отмечает в качестве преимуществ таких антенн их компактность, многополосность и широкополосность по сравнению с традиционно применяемыми антеннами, в том числе,

патч-антеннами [1, 4–6, 10–12]. Другие утверждают, что никаких заметных преимуществ фрактализация антенны не дает [13]: количество рабочих частот не возрастает, ширина их полосы существенным образом не увеличивается, а ряд характеристик даже ухудшается. Якобы при этом уменьшается сопротивление излучения, диаграмма направленности искажается, а интенсивность ее главного лепестка быстро падает с увеличением частоты сигнала. Кроме того, фрактальные антенны в конструктивном и технологическом отношении сложнее и себестоимость их выше.

В связи с неоднозначностью мнений о том, обладают ли фрактальные антенны какими-либо преимуществами по сравнению с их обычными аналогами, возникает актуальная задача разобраться в этом вопросе путем поэтапного по числу итераций моделирования технических характеристик обеих типов антенн и их сравнения между собой. При этом необходимо принять во внимание, что вплоть до частот порядка 100 ГГц рассматриваемого типа антенны можно считать электромагнитными, а в терагерцовом диапазоне приходится учитывать возбуждение в них связанных состояний электромагнитных волн и волн зарядовой плотности – плазмон-поляритонов, обладающих резко выраженными дисперсионными свойствами.

Целью настоящей статьи и является решение данной задачи.

Материалы и методы

Рассматриваются две монополярные фрактальные патч-антенны типа «треугольный ковер Серпинского»: одна для работы в диапазоне частот 4–100 ГГц, другая – в диапазоне 200–1300 ТГц. Форма патчей обеих антенн одинакова и представляет собой треугольник Серпинского в итерациях 0, 1, 2, 3 (рис. 1).

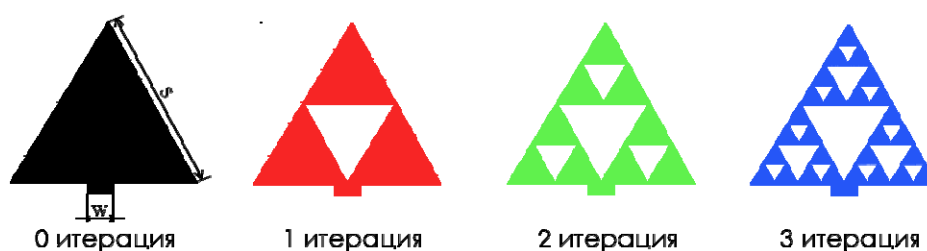


Рис. 1. Геометрия исследуемых патч-антенн. Для ГГц-антенны: материал – медь, длина стороны большого треугольника $s = 2,63$ мкм; диэлектрик – фторопласт ($\epsilon_r = 2,5$), его толщина $t = 0,1$ мм; ширина сигнального полоска $W = 1,09$ мм. Для ТГц-антенны: материал – графен, $s = 625$ нм; диэлектрик – карбид кремния ($\epsilon_r = 9,66$); $t = 10$ нм; $W = 40$ нм

Между патчем и заземленной металлической пластиной находится диэлектрик. В случае плазмон-поляритонной ТГц-антенны для сдвига уровня Ферми в графене относительно точки Дирака между ним и заземленной пластиной прикладывается затворное напряжение положительной полярности, чтобы реализовать в графене электронную проводимость.

Математическое моделирование характеристик обеих антенн осуществлялось в программе CST Microwave Studio. В ней заложен следующий подход к проблеме: уравнения Максвелла сводятся к волновым уравнениям,

затем волновое уравнение для напряженности электрического поля приводится к неоднородному уравнению Гельмгольца, которое с учетом однородных граничных условий решается с использованием функций Грина, где источником является плотность тока проводимости. Таким образом, электрическое поле, возбуждаемое совокупностью колеблющихся электронов в различных точках антенны, является суммой полей, создаваемых в отдельных точках. Далее находится распределение электрического поля или мощности излучения антенны в дальней зоне, выраженное через преобразование Фурье распределения тока проводимости [5].

В случае плазмон-поляритонной антенны вследствие дисперсии удельного сопротивления графена плотность тока проводимости испытывает сильную зависимость от частоты сигнала. Поэтому приходится дополнительно вводить в программу расчета характеристик антенны эту зависимость. При этом для ТГц-антенн обычно ограничиваются приближением Друде, учитывающем лишь внутризонную поверхностную проводимость графена [5]. Ниже мы частично ссылаемся на результаты из нашей работы [8], в которой также использовано это приближение.

Результаты

Частотные зависимости основных характеристик

На рис. 2, 3 приведены результаты расчетов частотной зависимости элемента S_{11} матрицы рассеяния, коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) и входного импеданса Z обеих исследуемых антенн.

Первое, что бросается в глаза на рис. 2, это то, что ширина резонансных полос существенно не зависит от наличия фрактальной структуры и порядка итерации. Второе – что положение резонансных пиков, отвечающих высшим модам, в зависимости от порядка итерации, может сдвигаться как в сторону меньших, так и в сторону больших частот. При этом острота пиков и их высота изменяются слабо.

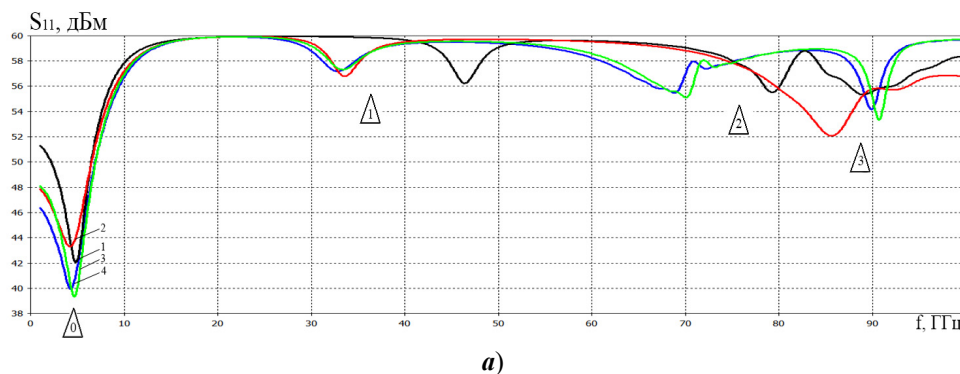


Рис. 2. Частотные зависимости параметра S_{11} в децибелах на милливатт (*а*), коэффициент стоячей волны напряжения (*б*) и Z -параметра (*в*) электромагнитной ГГц-антенны для различных итераций «ковра Серпинского». Цифры у кривых указывают порядок итерации, а цифры в треугольниках – номер резонанса (0 соответствует частоте основного резонанса, а 1, 2, 3 – резонансным частотам ближайших высших мод)

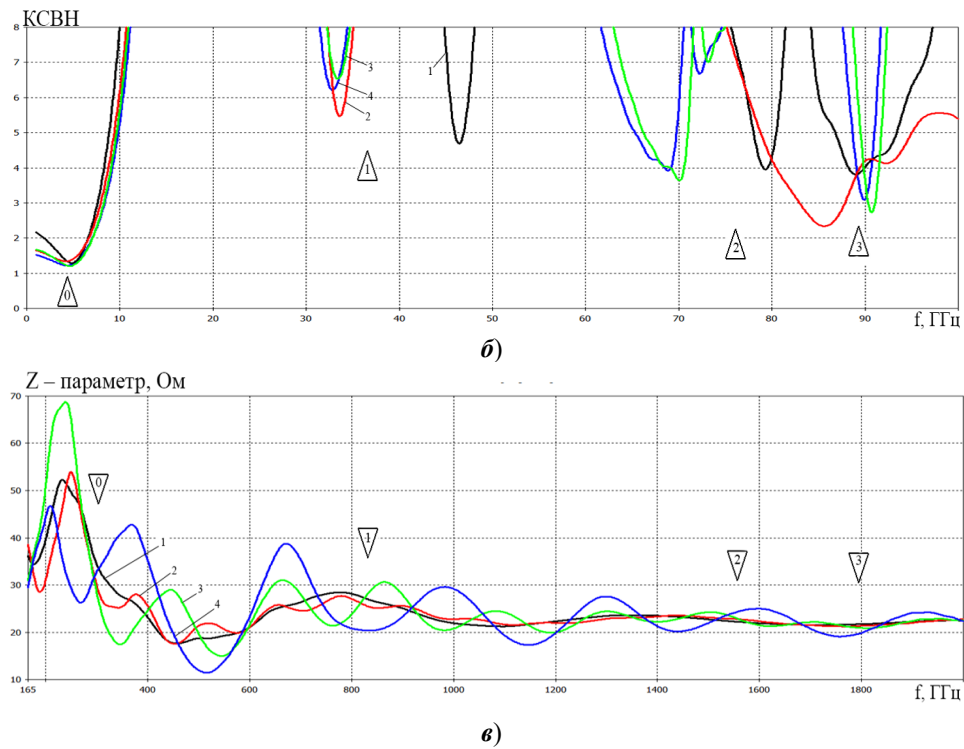


Рис. 2. Окончание

Для большей наглядности полученные результаты сведены в табл. 1, 2 отдельно для электромагнитной ГГц-антенны и плазмон-поляритонной ТГц-антенны.

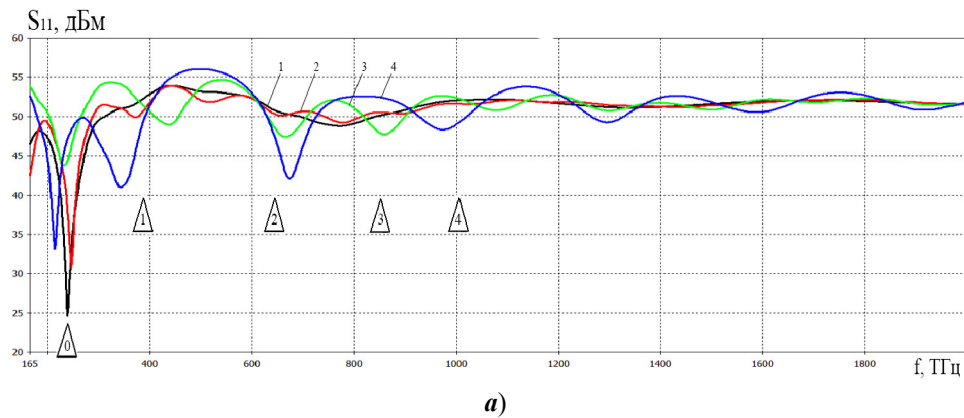


Рис. 3. Частотные зависимости параметра S_{11} в децибелах на милливатт (а), коэффициент стоячей волны напряжения (б) и Z-параметра (в) плазмон-поляритонной ТГц-антенны для различных итераций «ковра Серпинского». Цифры у кривых указывают порядок итерации, а цифры в треугольниках – номер резонанса (0 соответствует частоте основного резонанса, а 1, 2, 3, 4 – резонансным частотам ближайших высших мод

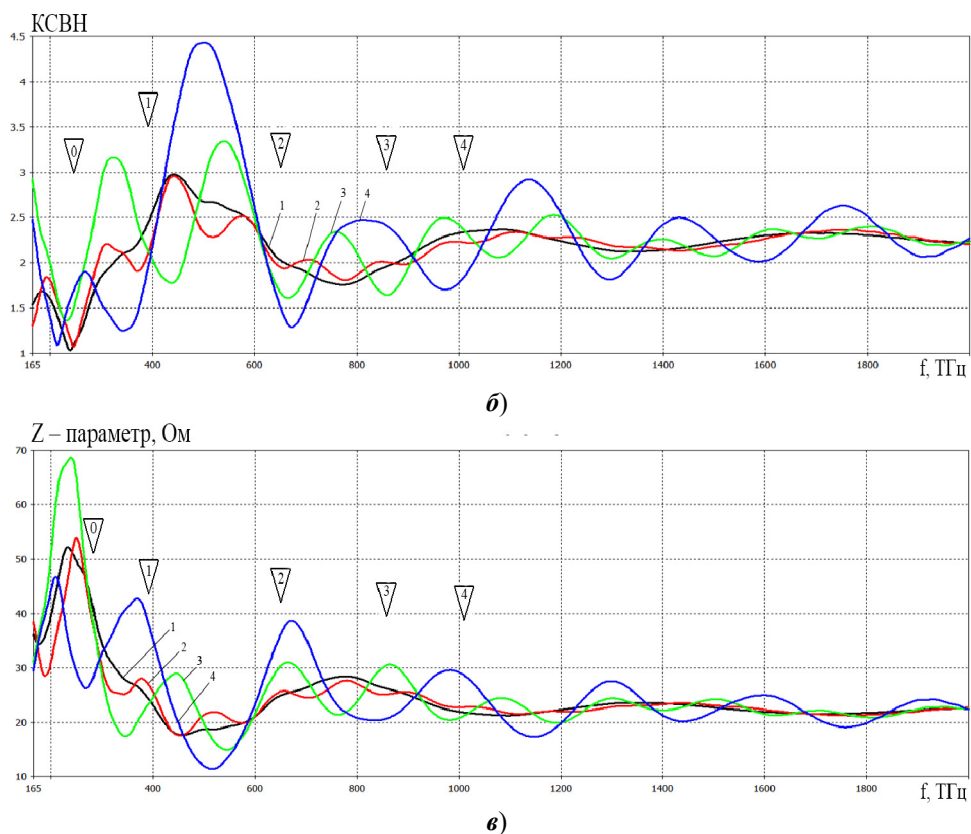


Рис. 3. Окончание

Таблица 1
Характеристики исследуемой электромагнитной ГГц-антенны

Итерация	Резонансная частота, ГГц	КСВН	Z, Ом	S_{11} , дБм
0	4,86	1,29	40	42
	46,4	4,70	184	56
	79,3	3,95	39	56
	89,0	3,82	158	55
1	3,52	1,35	39	43
	33,7	5,61	244	57
	85,8	2,31	113	52
	92,6	4,23	43	56
2	3,38	1,31	40	43
	33,6	6,18	252	57
	70,6	3,50	160	55
	91,2	2,57	96	53
3	4,30	1,22	43	40
	32,9	6,21	237	58
	68,8	3,92	193	56
	89,9	3,09	107	54

В то же время на рис. 3 заметно сильное влияние фрактализации на характеристики плазмон-поляритонной ГГц-антенны. Если для канонической

нефрактальной антенны в исследованном диапазоне частот наблюдается лишь один резонансный пик, то ее фрактализация уже в первом порядке приводит к появлению пяти новых резонансных частот. Острота пиков также увеличивается с возрастанием порядка итерации. На КСВН фрактализация такой антенны сильно не сказывается. Входной импеданс изменяется не так сильно, как в случае электромагнитной ГГц-антенны.

Таблица 2

Характеристики исследуемой плазмон-поляритонной ТГц-антенны

Итерация	Резонансная частота, ТГц	КСВН	Z, Ом	S_{11} , дБм
0	238	1,04	52	25
1	246	1,08	54	31
	371	1,90	28	50
	517	2,28	22	52
	657	1,93	26	50
	776	1,80	28	49
2	233	1,37	68	44
	437	1,77	29	49
	664	1,59	31	47
	859	1,62	31	48
	1075	2,04	25	51
3	213	1,09	46	53
	343	1,25	41	41
	673	1,27	39	42
	972	1,69	30	48
	1294	1,79	28	49

Диаграммы направленности

На рис. 4, 5 представлены диаграммы направленности исследуемых электромагнитной ГГц-антенны и плазмон-поляритонной ТГц-антенны соответственно. На них отражена зависимость формы, направленности, интенсивности главного лепестка, наличия и интенсивности боковых лепестков этих диаграмм от порядка итерации «ковра Серпинского» (столбцы слева направо) и резонансной частоты (возрастает сверху вниз).

Сравнивая рис. 4, 5, а также приведенные при них характеристики диаграмм направленности, можно заметить, что фрактализация канонической нефрактальной электромагнитной антенны не улучшает, а в ряде случаев даже ухудшает ее свойства. В случае же плазмон-поляритонной антенны имеет место перераспределение энергии излучения по резонансным частотам и улучшение некоторых свойств антенны.

Обсуждение

Из результатов, представленных на рис. 2–5 и в табл. 1, 2, следует, что фрактализация электромагнитной монополюсной треугольной патч-антенны ТГц-диапазона не влияет на количество ее резонансных частот. Независимо от порядка итерации (от 1 до 3), во всех случаях в диапазоне частот 4–100 ГГц наблюдалось столько же резонансов, сколько их имелось в обычной, нефрактальной антенне, т.е. частота основного резонанса, отвечающего исходному треугольнику, плюс еще три резонанса на высших модах. При пе-

роходе на более высокие резонансные частоты КСВН существенно ухудшается, а входной импеданс сначала резко возрастает (на первой высшей моде), а затем падает. Параметр рассеяния возрастает не более, чем в 1,4 раза.

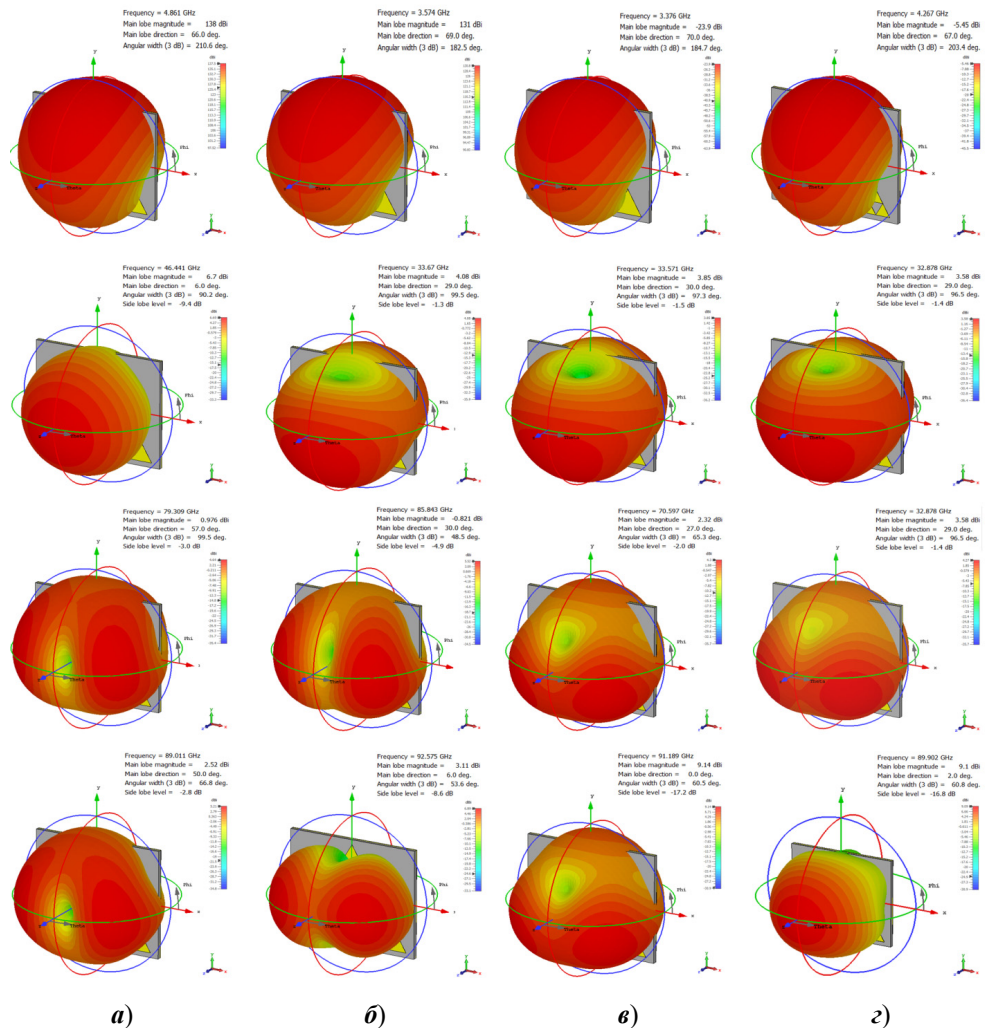


Рис. 4. Диаграммы направленности электромагнитной ГГц-антенны в зависимости от порядка итерации «ковра Серпинского» (0-я итерация (а), 1-я итерация (б), 2-я итерация (в), 3-я итерация (г)) и резонансной частоты (по вертикали)

На основной резонансной частоте с увеличением порядка итерации интенсивность главного лепестка диаграммы направленности быстро падает, а ее форма вытягивается в одну сторону. На более высоких резонансных частотах интенсивность главного лепестка диаграммы направленности значительно меньше, чем на основной резонансной частоте, и быстро падает с ростом частоты. Форма диаграммы направленности изменяется, и появляются боковые лепестки.

В случае плазмон-поляритонной монополярной патч-антенны ТГц-диапазона такой же формы фрактализация патча вносит заметные изменения в ее характеристики. Начиная уже с первой итерации увеличивается количе-

ство резонансных частот. В диапазоне частот 200–1300 ТГц их насчитывается до пяти. При этом почти на всех резонансных частотах КСВН < 2 и лишь в двух случаях слегка превышает значение 2. Входной импеданс антенны на высших модах ниже, чем на основном резонансе, но не более, чем в 1,6–2,7 раза. Параметр рассеяния возрастает не более чем в 2,1 раза.

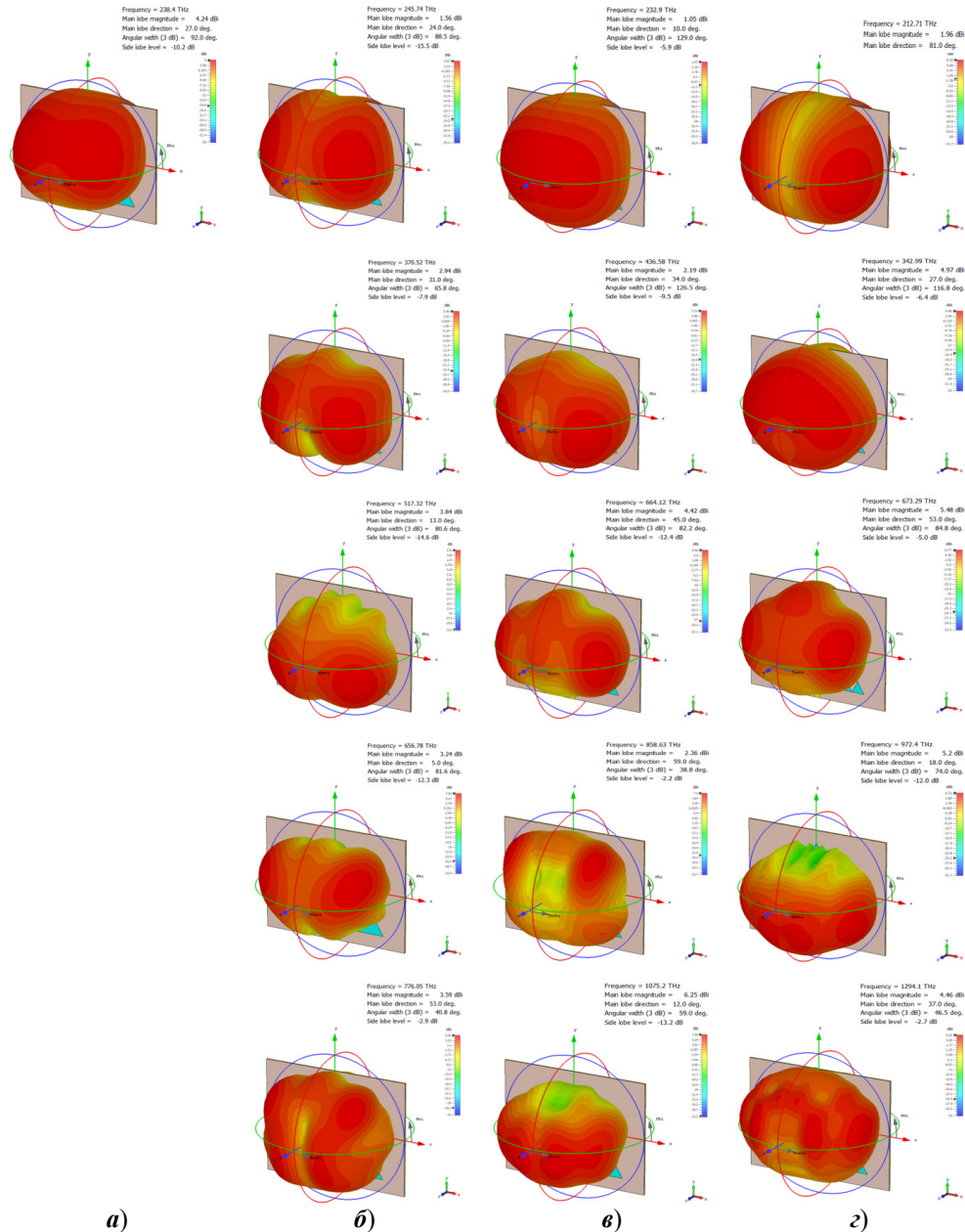


Рис. 5. Диаграммы направленности плазмон-поляритонной ТГц-антенны в зависимости от порядка итерации «ковра Серпинского» (0-я итерация (а), 1-я итерация (б), 2-я итерация (в), 3-я итерация (г)) и резонансной частоты (по вертикали)

Диаграмма направленности меняет форму, и появляются боковые лепестки лишь начиная с третьей итерации «ковра Серпинского». С увеличением порядка итерации интенсивность главного лепестка диаграммы направленности и ее угловая ширина могут даже увеличиваться.

На наш взгляд, причиной столь разного влияния фрактализации электромагнитных и плазмон-поляритонных антенн на их характеристики является дисперсия электропроводности, диэлектрической проницаемости и, как следствие, скорости распространения плазмон-поляритонных волн.

Электромагнитные волны с волнами зарядовой плотности в материале ГГц-антенны не образуют плазмон-поляритонов и практически не обладают дисперсией. Резонансы на высших модах колебаний определяются геометрией антенны. Фрактальные элементы антенны, имея кратно меньшие размеры, начинают работать на тех же самых частотах. Сигналы от них приходят с различными фазовыми сдвигами, что может даже ухудшить результирующие характеристики антенны.

В случае плазмон-поляритонной ТГц-антенны резонансы на высших модах исходной структуры практически не наблюдаются. По мере кратного уменьшения размеров фрактальных элементов антенны их резонансные отклики накладываются на основной сигнал, однако из-за разной скорости распространения плазмон-поляритонов для различных итераций фрактала их резонансные частоты сдвинуты относительно друг друга. В итоге результирующий сигнал для различных фрактальных итераций антенны выглядит поразному. Но при этом наблюдается общая закономерность: с увеличением порядка итерации вклад высших резонансов возрастает.

Заключение

Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что использование фрактальных патч-антенн вплоть до гигагерцового диапазона с целью увеличения их многополосности при более высокой компактности не оправдывает возлагаемых на них надежд, а приводит лишь к их усложнению и удорожанию.

Применение плазмон-поляритонных фрактальных патч-антенн в терагерцовом диапазоне, напротив, позволяет достигнуть положительных результатов в виде возрастания числа резонансных частот, на которых реализуются неплохие характеристики.

Кроме того, изменяя затворное напряжение между патчем и заземленной пластиной плазмон-поляритонной антенны, можно управлять ее рабочими частотами.

Список литературы

1. Al-Zabee A. A. K., Jabbar S. Q., Wang D. Fractal antennas (Study and Review) // International Journal of Computers and Technology. 2016. Vol. 15, № 13. P. 7387–7400. doi: 10.24297/ijct_v15i13.31
2. Бойков И. В., Айкашев П. В. К вопросу об анализе и синтезе фрактальных антенн // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 4. С. 92–110. doi: 10.21685/2072-3059-2018-1-8
3. Avula R., Rangarao M., Kumari Y. Fractal ultra wide band antenna for 5G applications // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2020. Vol. 7, № 5S4. P. 215–218.

4. Boretti A., Rosa L., Blackledge J., Castelletto S. A preliminary study of a graphene fractal Sierpinski antenna // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 840. P. 012003. doi: 10.1088/1757-899X/840/1/012003
5. Blackledge J., Boretti A., Rosa L., Castelletto S. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1060. P. 012001. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012001
6. Вдовина Г. М. Краткий обзор результатов исследования новых методов генерации, передачи и приема колебаний и волн на основе методов фрактальной геометрии // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2020. Т. 28, № 1. С. 8–28. doi: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-8-28
7. Смирнов А. В., Фионов А. С., Горбачев И. А., Шамсутдинова Е. С., Кузнецова И. Е., Колесов В. В. Использование аддитивных технологий для создания широкополосных антенн с фрактальной геометрией // *Радиоэлектроника*. 2021. Т. 13, № 4. С. 427–434. doi: 10.17725/rensit.2021.13.427
8. Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Фрактальная графеновая плазмон-поляритонная патч-наноантенна для ближнего инфракрасного и оптического диапазонов частот // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2024. № 2. С. 98–111. doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7
9. Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Дипольная графеновая фрактальная плазмон-поляритонная патч-наноантенна для ИК и оптического диапазона частот // *Радиоэлектронная техника : межвузовский сб. науч. тр. Ульяновск : УлГТУ*, 2024. С. 30–39.
10. Rosa L., Sun K., Juodkazis S. Sierpinski fractal plasmonic nanoantennas // *Physica Status Solidi (RRL)*. 2011. Vol. 5, № 5–6. P. 175–177. doi: 10.1002/pssr.201105136
11. Sederberg S., Elezzabi A. Y. Sierpinski fractal plasmonic antenna: A fractal abstraction of the plasmonic bowtie antenna // *Optic Express*. 2011. Vol. 19, № 11. P. 10456–10461. doi: 10.1364/OE.19.010456
12. Hussien R. T., Abood D. I. A wideband hybrid plasmonic patch nanoantenna // *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJECET)*. 2014. Vol. 5, № 9. P. 1–8.
13. Hansen R. C., Colin R. E. *Small Antenna Handbook*. John Wiley and Sons, 2011. 360 p.

References

1. Al-Zabee A.A.K., Jabbar S.Q., Wang D. Fractal antennas (Study and Review). *International Journal of Computers and Technology*. 2016;15(13):7387–7400. doi: 10.24297/ijct_v15i13.31
2. Boykov I.V., Aykashev P.V. On the issue of analysis and synthesis of fractal antennas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(4):92–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2018-1-8
3. Avula R., Rangarao M., Kumari Y. Fractal ultra wide band antenna for 5G applications. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020;7(5S4):215–218.
4. Boretti A., Rosa L., Blackledge J., Castelletto S. A preliminary study of a graphene fractal Sierpinski antenna. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;840:012003. doi: 10.1088/1757-899X/840/1/012003
5. Blackledge J., Boretti A., Rosa L., Castelletto S. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1060:012001. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012001
6. Vdovina G.M. A brief overview of the results of research into new methods of generating, transmitting and receiving oscillations and waves based on fractal geometry methods. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika = University proceedings. Ap-*

- plied nonlinear dynamics*. 2020;28(1):8–28. (In Russ.). doi: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-8-28
7. Smirnov A.V., Fionov A.S., Gorbachev I.A., Shamsutdinova E.S., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V. Using additive manufacturing to create broadband antennas with fractal geometry. *Radioelektronika = Radioelectronics*. 2021;13(4):427–434. (In Russ.). doi: 10.17725/rensit.2021.13.427
 8. Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Fractal graphene plasmon-polariton patch nanoantenna for near infrared and optical frequency ranges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(2):98–111. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7
 9. Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Dipole graphene fractal plasmon-polariton patch nanoantenna for IR and optical frequency range. *Ra-dioelektronnaya tekhnika: mezhvuzovskiy sb. nauch. tr. = Radioelectronic engineering: interuniversity collected papers*. Ulyanovsk: UIGTU, 2024:30–39. (In Russ.)
 10. Rosa L., Sun K., Juodkasis S. Sierpinski fractal plasmonic nanoantennas. *Physica Status Solidi (RRL)*. 2011;5(5–6):175–177. doi: 10.1002/pssr.201105136
 11. Sederberg S., Elezzabi A.Y. Sierpinski fractal plasmonic antenna: A fractal abstraction of the plasmonic bowtie antenna. *Optic Express*. 2011;19(11):10456–10461. doi: 10.1364/OE.19.010456
 12. Hussien R.T., Abood D.I. A wideband hybrid plasmonic patch nanoantenna. *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJECET)*. 2014;5(9):1–8.
 13. Hansen R.C., Colin R.E. *Small Antenna Handbook*. John Wiley and Sons, 2011:360.

Информация об авторах / Information about the authors

Рудольф Александрович Браже

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, Ульяновский государственный
технический университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

E-mail: brazhe@ulstu.ru

Rudol'f A. Brazhe

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of the sub-
department of physics, Ulyanovsk State
Technical University (32 Severniy Venets
street, Ulyanovsk, Russia)

Егор Юрьевич Лебедев

студент, Ульяновский государственный
технический университет
(Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32)

E-mail: lebedev.egor@ulsk173.ru

Egor Yu. Lebedev

Student, Ulyanovsk State Technical
University (32 Severniy Venets street,
Ulyanovsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.04.2025

Принята к публикации / Accepted 23.05.2025