



УДК 621.396.67

**В. Е. Пониматкин, А. А. Тишкин  
А. В. Казаков, Г. С. Подлубная**

**ДИПОЛЬНАЯ АНТЕННА С МОДИФИЦИРОВАННОЙ  
ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ ТИПА  
«ТРЕУГОЛЬНИК СЕРПИНСКОГО»**

*Разрабатывается и исследуется модифицированная антенна с расширенным диапазоном частот, построенная на основе фрактальной структуры типа «треугольник Серпинского», позволяющей существенно уменьшить габариты конструкции.*

*The article is devoted to the development and investigation of a modified antenna with an extended frequency range constructed on the basis of a fractal structure of the «Sierpinski triangle» type, which allows to significantly reduce the dimensions of the structure.*

**Ключевые слова:** антенно-фидерные устройства, фрактализованная антенна, итерация, резонансная частота, диполь.

**Key words:** antenna-feeder devices, fractalized antenna, iteration, resonance frequency, dipole.

Бурное развитие телекоммуникационных технологий за последние десятилетия привело к существенному ужесточению требований, предъявляемых к массогабаритным характеристикам антенно-фидерных устройств. В первую очередь это связано с необходимостью миниатюризации компонентов радиочастотного тракта и их интеграции с антенно-фидерными устройствами в виде единой конструкции [1].

Одним из способов уменьшения габаритов антенн без значительного ухудшения остальных, значимых для связи характеристик, таких как эффективность излучения и полоса частот, является применение фрактальных структур в конструкции антенны, чему посвящено значительное количество работ [2; 3].

Известно, что дипольная антенна, фрактализованная структурой типа «треугольник Серпинского», имеет при тех же размерах, что и нефрактализованная антенна (антенна с нулевой итерацией фрактальной структуры), меньшую резонансную частоту [4]. Таким образом, размеры фрактализованной антенны меньше чем обычно при одинаковой резонансной частоте. Однако проведенные исследования показали, что фрактализация диполя структурой типа «треугольник Серпинского» не дает значительного уменьшения резонансной частоты, которая к тому же сопровождается снижением КПД антенны и уменьшением рабочего диапазона антенны [5].



Традиционная антенна с фрактальной структурой типа «треугольник Серпинского» третьей степени итерации в виде диполя или монополя имеет плечо, показанное на рисунке 1, где точки

$$A_{a_1}, B_{a_1}, C_{a_1}, a_1 = 1$$

соответствуют вершинам внутренних треугольников фрактала Серпинского 1-й итерации;

$$A_{a_1 a_2}, B_{a_1 a_2}, C_{a_1 a_2}, a_1 = 1, a_2 \in \{1, 2, 3\}$$

соответствуют вершинам внутренних треугольников фрактала Серпинского 2-й итерации;

$$A_{a_1 a_2 a_3}, B_{a_1 a_2 a_3}, C_{a_1 a_2 a_3}, a_1 = 1, a_2 \in \{1, 2, 3\}, a_3 \in \{1, 2, 3\}$$

соответствуют вершинам внутренних треугольников фрактала Серпинского 3-й итерации.

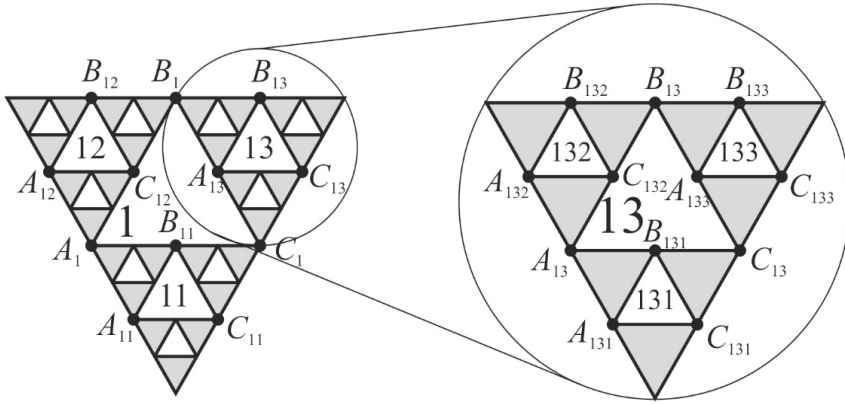


Рис. 1. Плечо антенны в виде треугольника Серпинского 3-й итерации

Плечо с фракталом Серпинского  $n$ -й итерации может быть построено по аналогии с рисунком 1, где вершины будут обозначаться следующим образом:

$$\begin{aligned}
 &A_{a_1}, B_{a_1}, C_{a_1}, a_1 = 1; \\
 &A_{a_1 a_2}, B_{a_1 a_2}, C_{a_1 a_2}, a_1 = 1, a_2 \in \{1, 2, 3\}; \\
 &A_{a_1 a_2 a_3}, B_{a_1 a_2 a_3}, C_{a_1 a_2 a_3}, a_1 = 1, a_2 \in \{1, 2, 3\}, a_3 \in \{1, 2, 3\}; \\
 &\dots \\
 &A_{a_1 a_2 \dots a_n}, B_{a_1 a_2 \dots a_n}, C_{a_1 a_2 \dots a_n}, a_1 = 1, a_2 \in \{1, 2, 3\}, \dots, a_n \in \{1, 2, 3\}.
 \end{aligned}$$

Если во всех точках имеется электрический контакт, то высокочастотный ток будет протекать по поверхности антенны в соответствии с рисунком 2 (для высших итераций фрактала Серпинского путь высокочастотного тока строится по аналогии).

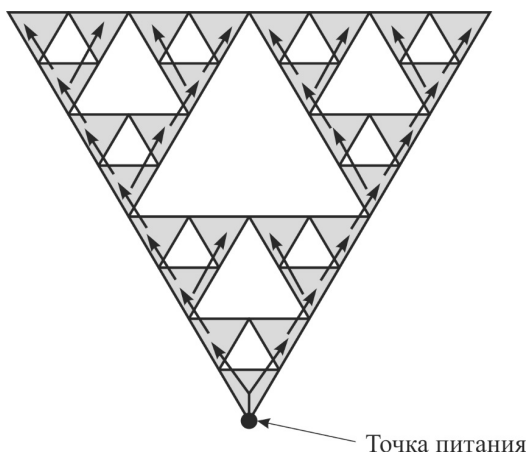


Рис. 2. Пути высокочастотного тока при наличии электрического контакта во всех точках

Разорвем электрический контакт во всех точках

$$C_{a_1}, C_{a_1a_2}, C_{a_1a_2a_3}, C_{a_1a_2a_3...a_n}'$$

тогда путь электрического тока изменится и будет протекать по поверхности антенны в соответствии с рисунком 3 (для высших итераций фрактала Серпинского путь высокочастотного тока строится по аналогии). Кружками обозначены места разрыва электрического контакта.

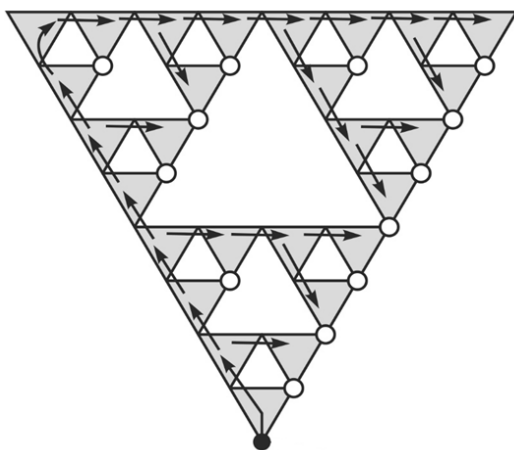


Рис. 3. Плечо антенны в виде модифицированного фрактала Серпинского

Как видно из рисунка 3, в модифицированной антенне путь высокочастотного тока значительно увеличен, что дает основание предполагать существенное снижение резонансной частоты антенны. Однако токи, протекая в противоположных направлениях по некоторым фрагментам антенны, частично компенсируют друг друга, что должно привести к падению КПД.

Проверить данные предположения можно с помощью расчетных методов вычислительной электродинамики, реализованных в различных системах автоматизированного проектирования электродинамических структур. Сравнительную характеристику указанных методов можно найти в [6].

Оценка характеристик модифицированных и немодифицированных антенн проведена с помощью пакета моделирования FEKO компании EM Software & Systems. Сравнение проводилось на примере дипольных антенны 1–5 итераций, в которых второе плечо диполя было получено поворотом исходного плеча на  $180^\circ$  вокруг оси  $Ox$  – модификация 1 (рис. 4а) и зеркальным отображением относительно плоскости  $Oxy$  – модификация 2 (рис. 4б). Каждое плечо диполя представляет собой равнобедренный треугольник с высотой  $h = 0,2$  м и основанием  $a = 0,2$  м. Характеристики антенны второй модификации в силу метода зеркальных отображений соответствуют несимметричному фрактальному треугольному вибратору, расположенному на бесконечной проводящей плоскости. Примеры результатов расчетов приведены на рисунках 5, 6. Обобщенные сведения по расчетам фрактальных антенн 1–5 итераций представлены в таблице.

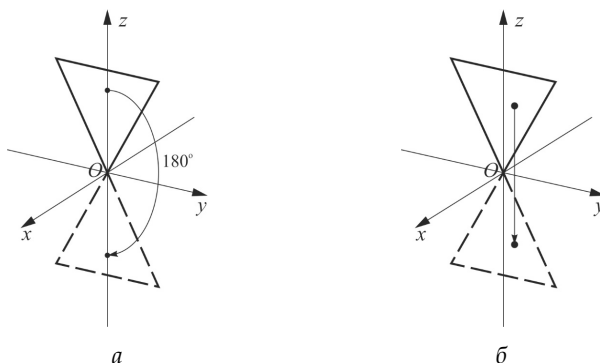


Рис. 4. Формирование дипольной антенны:  
а – модификация 1; б – модификация 2

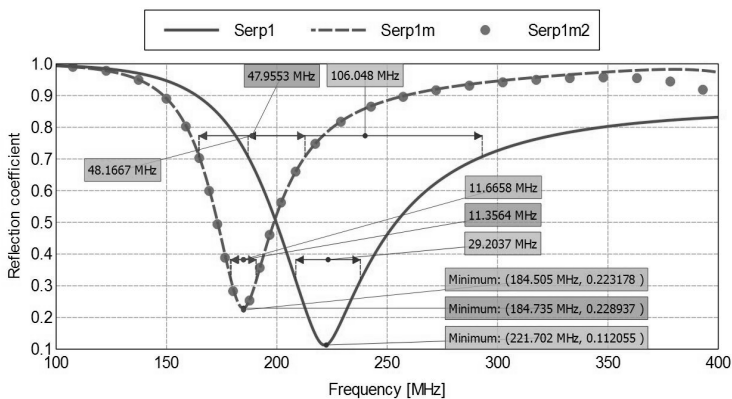


Рис. 5. График для фрактальных антенн 1-й итерации,  
где Serp1 – немодифицированная антенна;  
Serp1m – модификация 1; Serp1m2 – модификация 2

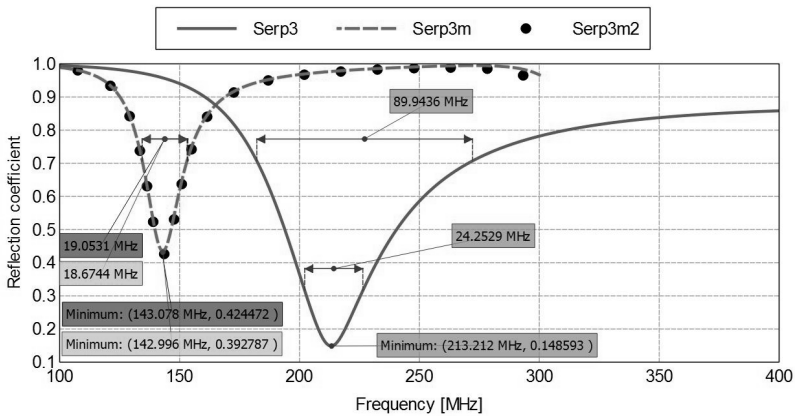


Рис. 6. График  $|S_{11}|$  для фрактальных антенн 3-й итераций, где Serp3 – немодифицированная антенна; Serp3m – модификация 1; Serp3m2 – модификация 2

**Сравнительные характеристики антенных систем**

Характеристика	Итерация фрактала	Немод. антенна	Мод. 1	Мод. 2
1	2	3	4	5
$ S_{11} _{\min}$ , дБ	1	-19,01	-12,81	-13,03
Частота минимума $ S_{11} $ , МГц	1	221,70	184,74	184,51
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -10$ дБ, МГц	1	29,20	11,35	11,67
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -3$ дБ, МГц	1	106,05	47,96	48,17
$ S_{11} _{\min}$ , дБ	2	-17,50	-9,35	-9,61
Частота минимума $ S_{11} $ , МГц	2	216,34	160,82	160,85
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -10$ дБ, МГц	2	26,06	—	—
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -3$ дБ, МГц	2	95,22	28,95	29,36
$ S_{11} _{\min}$ , дБ	3	-16,56	-8,12	-7,44
Частота минимума $ S_{11} $ , МГц	3	213,21	143,00	143,08
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -10$ дБ, МГц	3	24,25	—	—
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -3$ дБ, МГц	3	89,94	18,67	19,05
$ S_{11} _{\min}$ , дБ	4	-15,97	-7,22	-6,79
Частота минимума $ S_{11} $ , МГц	4	211,06	134,39	135,03
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -10$ дБ, МГц	4	23,00	—	—
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -3$ дБ, МГц	4	86,30	14,61	14,87
$ S_{11} _{\min}$ , дБ	5	-15,60	-5,80	-6,08
Частота минимума $ S_{11} $ , МГц	5	209,67	124,36	124,43
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -10$ дБ, МГц	5	22,18	—	—
$\Delta f$ по уровню $ S_{11}  = -3$ дБ, МГц	5	84,03	10,65	10,65



Очевидно, что частота минимума  $|S_{11}|$  для рассмотренных итераций модифицированных фрактальных антенн существенно уменьшается (от 1,2 до 1,7 раза), что свидетельствует о сдвиге рабочего диапазона антенны в низкочастотную область. Однако при модификации фрактала наблюдается сужение рабочего диапазона антенны и падение КПД (для 2-й модифицированной итерации и выше минимум  $|S_{11}|$  превышает порог в  $-10$  дБ). Значительных различий между 1-й и 2-й модификациями нет.

Из рисунка 5 следует, что фрактальная антенна 1-й итерации имеет соприкасающиеся границы рабочих диапазонов по уровню  $|S_{11}| = 0,5$  на частоте примерно 200 МГц. Таким образом, можно создать 2-диапазонную антенну замыканием и размыканием контакта в точке  $C_1$  (в обоих плечах или в одном, если антенна несимметричная). При замыкании контакта антенна будет работать в диапазоне 199,70–254,05 МГц, а при размыкании — в диапазоне 173,16–198,68 МГц с модулем коэффициента отражения меньше 0,5. Тогда общая полоса составит около 79 МГц по уровню  $|S_{11}| = 0,5$  а коэффициент перекрытия диапазона рабочих частот  $254/175 = 1,45$ , что на 14% больше, чем у не модифицированной антенны  $254/200 = 1,27$ .

#### Список литературы

1. Stutzman W. L., Tiele G. A. Antenna Theory and Design. N. Y., 2013.
2. Dhrgham R. N., Jaber S. A., Raad S. F. Design and Simulation of RFID Aperture Coupled Fractal Antenna // International Journal of Engineering Business Management. 2012. Vol. 4. P. 1–14.
3. Слюсар В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломанных» антенн. Часть 2 // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 6. С. 82–89.
4. Puente-Baliarda C. On the behavior of the Serpinski multiband fractal antenna // IEEE Transact. Of Antennas Propagation. 1998. Vol. 46. P. 517–524.
5. Balanis C. A. A Modern Antenna Handbook. N. Y., 2008.
6. Меркулов А. А., Пониматкин В. Е., Типикин А. А. Сравнение численных методов на примере решения задачи о входном сопротивлении симметричного параметризованного диполя в бесконечной изотропной среде // Инновации в науке, образовании и бизнесе — 2014 : тр. XII международной научной конференции. Калининград, 2014. Т. 2. С. 292–295.

#### Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Алексей Алексеевич Типикин — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА», Калининград.  
E-mail: alextip@mail.ru

Андрей Владиславович Казаков — адъюнкт, филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА», Калининград.  
E-mail: strannik\_1978@mail.ru

Габриэла Сергеевна Подлубная — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: GPodlubnaja@kantiana.ru



### About the authors

Dr Viktor Ponimatkin – Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Aleksey Tipikin – PhD, Senior Researcher, MESC MMF «VMF», Kaliningrad.  
E-mail: alextip@mail.ru

Andrey Kazakov – PhD student, MESC MMF «VMF», Kaliningrad.  
E-mail: strannik\_1978@mail.ru

Gabriela Podlubnaja – student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: GPodlubnaja@kantiana.ru

69

УДК 539.143.539.183

*Д. Г. Артёмов, В. Е. Пониматкин*

### К ВОПРОСУ О ВОССТАНОВЛЕНИИ СИГНАЛА ПРИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

*Исследованы процесс функционирования аналого-цифрового преобразователя и трудности, возникающих при восстановлении исходного сигнала. Представлено решение проблемы апертурной неопределенности путём использования конструктивного метода с приближительным анализом восстановленного сигнала.*

*The work of analog-to-digital converter and the problems arising in the reduction of the input signal are investigated. A solution to the problem of aperture uncertainty is presented by using a constructive method with an approximate analysis of the reconstructed signal.*

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь, апертурное время, дискретизация, восстановленный сигнал, цифровая обработка сигнала.

**Key words:** analog-to-digital converter, aperture time, sampling, recovered signal, digital signal processing.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) являются устройствами, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые сигналы. Процедура аналого-цифрового преобразования непрерывных сигналов, которую реализуют с помощью АЦП, представляет собой преобразование непрерывной функции времени  $U_c(t)$ , описывающей исходный сигнал, в последовательность чисел

$$U_c^1(t_j), j = 0, 1, 2, \dots,$$

отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени.