

РАДИОТЕХНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.396.677.3

Δ-ФРАКТАЛЬНЫЕ МАЛОРАЗМЕРНЫЕ ЩЕЛЕВЫЕ АНТЕННЫ

Цалиев Т.А.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

Δ-ФРАКТАЛЬНІ МАЛОРОЗМІРНІ ЩІЛИННІ АНТЕНИ

Цалієв Т.А.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

Δ-FRAKTAL SMALL SIZE SLOTTED ANTENNAS

Tsaliev T.A.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, Ukraine, 65029
tamerlan.tsaliev@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрены щелевые антенны на основе Δ-фракталов. Проанализированы результаты расчетов входного импеданса, коэффициента стоячей волны (КСВ), коэффициента направленного действия (КНД), полученные путем компьютерного моделирования. Сравняются результаты расчетов частотных зависимостей характеристик щелевых элементов и линейной полуволновой щели при различных соотношениях геометрических параметров. Указывается на возможность применения щелевых Δ-фрактальных антенных элементов относительно малых размеров в конструкциях, обладающих малым аэродинамическим сопротивлением, в том числе - создания на их основе компактных низкопрофильных излучателей и антенных решеток.

Ключевые слова: фракталы, Δ-фракталы, фрактальные антенны, компьютерное моделирование, входной импеданс, КСВ, КНД.

Анотація. Розглянуті щілинні антени на основі Δ-фракталів. Проаналізовані результати розрахунків вхідного імпедансу, коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ), коефіцієнта спрямованої дії (КСД), отримані шляхом комп'ютерного моделювання. Порівнюються результати розрахунків частотних залежностей характеристик щілинних елементів і лінійної напівхвильової щілини за різних співвідношень геометричних параметрів. Указується на можливість застосування щілинних фрактальних антенних елементів відносно малих розмірів в конструкціях, що мають малий аеродинамічний опір, у тому числі - створення на їх основі компактних низкопрофільних випромінювачів і антенних решіток.

Ключові слова: фрактали, Δ-фрактали, фрактальні антени, комп'ютерне моделювання, вхідний імпеданс, КСХ, КСД.

Abstract. On the basis of Δ-fractals slotted antennas are considered. The calculation data of the input impedance, standing wave ratio (VSWR) and the directivity, obtained by computer simulation, are analyzed. The results of calculations of frequency dependences of the characteristics of fractal elements and linear half-wave slot were compared at different geometrical parameters. There is indicated the possibility of using relatively small size slotted fractal antenna elements in structures having low aerodynamic resistance, including compact low-profile radiators and antenna arrays based on them.

Key words: fractals, Δ-fractals, fractal antennas, slotted antennas, computer modeling, input impedance, VSWR, directivity.

Понятие фрактала (впервые предложенное Бенуа Б. Мандельбротом [1]) и топология фрактальных множеств [2...4] на определенном этапе развития науки изменили традиционные математические понятия и положили начало новым многочисленным научным направлениям. Эти направления, в частности, перечислены в работе [5], одно из таких направлений – исследования топологических особенностей и электродинамических характеристик фрактальных антенн.

В антенной технике фрактальная топология, по-видимому впервые, нашла отражение в патентах американского инженера Натана Коэна [6]. Подобные проволочные антенны в своей основе содержат геометрические конструкции (называемые «конструктивными» фракталами) такие, как линейные фракталы Коха, Минковского и др.

Фрактальная топология лежит в основе конструкций различных антенн [8]. В частности, в работе [9] автором данной статьи исследованы малоразмерные проволочные антенны, формируемые на основе предфрактальных элементов Δ -фрактальных множеств.

Однако электродинамические характеристики щелевых элементов, построенных на основе Δ -фрактальной топологии, до настоящего времени не были исследованы.

Цель данной статьи состоит в рассмотрении особенностей топологии Δ -фрактальных щелевых антенных элементов, анализе их электродинамических характеристик и сравнении с аналогичными характеристиками линейной узкой щели.

С точки зрения электродинамики топология антенных структур, рассматриваемых в этой статье, достаточно сложна. Практически невозможно использовать адекватные аналитические методы, пригодные для исследования электродинамических характеристик подобных антенн. Поэтому исследование свойств фрактальных антенных элементов обычно выполняется путем компьютерного моделирования основанного на численном решении интегральных уравнений [9].

Геометрия конструктивных фракталов. Как известно [1], фракталы – это элементы фрактальных множеств, которые образованы согласно заданному алгоритму. Элементы множеств, часто называемые *геометрическими* или *конструктивными* фракталами [2...4], обладают свойством самоподобия и обычно строятся на основе рекурсивной процедуры. При этом свойство точного самоподобия характерно лишь для *регулярных* фракталов.

Возможный алгоритм построения троичного Δ -фрактального множества [9] следующий.

Инициатор фрактала имеет вид двухзвенной ломаной кривой, состоящей из прямолинейных отрезков длиной L , ориентированных по отношению друг к другу под углом α (рис. 1, *a*).

При итерации первого порядка, каждое из двух звеньев инициатора разделим на три равные части длиной $L/3$. Далее выполним поворот верхних частей вокруг точек D и E на угол $\beta = \pi - \alpha$, совместив крайние точки (жирная пунктирная линия на рис. 1, *a*).

Ломаная, полученная в результате этой процедуры (рис. 1, *b*), содержит шесть звеньев длиной $L/3$ и, состоит из трех одинаковых двухзвенных элементов подобных инициатору. Причем второй из них является смещенным отображением первого с поворотом на π вокруг оси y . Повторив описанную процедуру для всех трех элементов, образуем ЭФМ второго порядка итерации – ломаную линию из 18 звеньев длиной $L/9$ (рис. 1, *в*). Она состоит из трех уменьшенных копий фрактала первой итерации. Далее итерационная процедура может быть бесконечно продолжена, и после каждой итерации число звеньев ломаной утраивается. Создаваемое множество названо в [9] троичным Δ -фракталом и обозначено как Δ_3 .

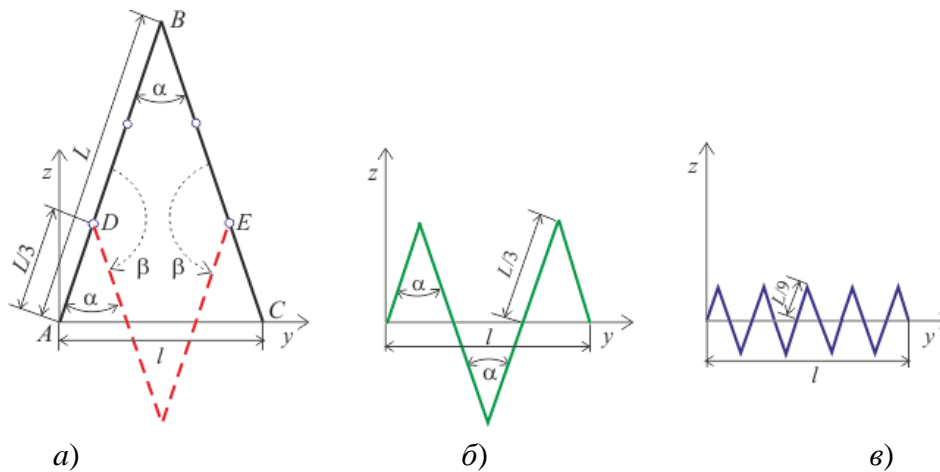


Рисунок 1 – Построение троичного Δ -фрактала: а) инициатор фрактала; б) первая итерация, $N = 6$; в) вторая итерация, $N = 18$

Для формирования щелевого антенного элемента на основе троичного Δ -фрактала в качестве формообразующей конструкции можно, например, взять результат итерации (предфрактал) n -го порядка. Выбрав плоский тонкий круговой проводящий экран радиусом $R = \lambda_0/2$, и удалив в нем участки соответствующей формы, получим требуемый элемент (рис. 2, а).

В качестве антенного элемента, принимаемого далее для сравнения, будем рассматривать линейную щель, прорезанную в таком же экране (рис. 2, б). Поперечный размер t щелей в обеих конструкциях выбирается одинаковым и равным 3 мм.

Методика исследования и геометрические характеристики исследуемых антенн.

Описываемое ниже исследование характеристик щелевых антенных элементов, построенных на основе линейных Δ_3 -фракталов, проводилось на основе численного моделирования в задаваемой полосе частот.

При этом решалась дифракционная задача, определялось амплитудно-фазовое распределение (АФР) токов на антенном элементе – экране с прорезанной в нем линейной щелью или щелью в форме «предфрактала» линейного Δ_3 -фрактального множества.

В среде программного комплекса *FEKO* решение подобных задач основано на интегральном уравнении относительно плотности поверхностного тока, с использованием метода моментов. При этом все линейные и плоские элементы конструкции разбиваются на малые, по сравнению с длиной волны, проволочные сегменты. Таким образом, определение плотности поверхностных токов сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Достоверность результатов во всем частотном диапазоне обеспечивается надлежащим выбором размера сегментов равного $\lambda_0/60$ (где λ_0 – расчетная длина волны, соответствующая частоте 1 ГГц).

Путем численного интегрирования найденного амплитудно-фазового распределения токов можно рассчитать входные характеристики исследуемых антенных элементов и их направленные свойства. Все расчеты проводились в диапазоне 0,2...1,8 ГГц на выбранных дискретных частотах с интервалом в 5 МГц.

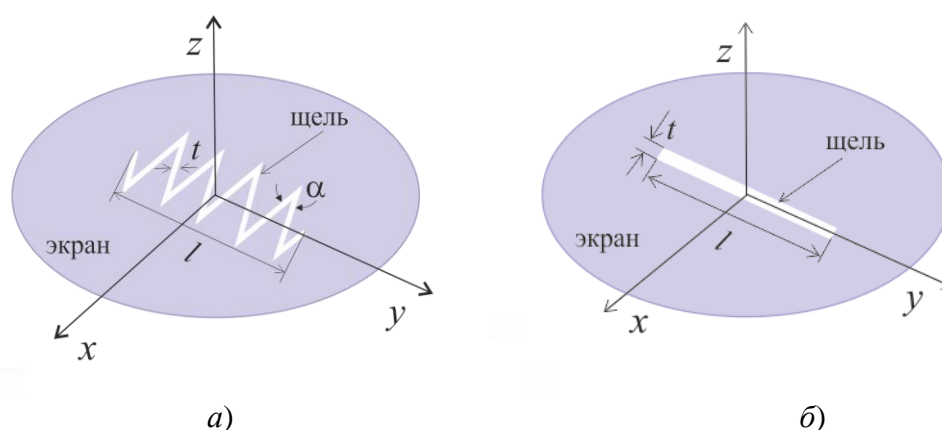


Рисунок 2 – Модели исследуемых щелевых антенн:
 а) Δ -фрактальная (2-я итерация) щель, $\alpha = 20^\circ$; б) линейная щель

Элементы антенн выполнены из идеального проводника, возбуждение щелей осуществляется в центре, а их геометрические параметры таковы:

- продольный размер $l = 0,25\lambda_0$;
- ширина щелей 3 мм;
- радиус экрана $0,5\lambda_0$.

Остальные параметры исследуемых моделей приведены ниже, в табл. 1.

Обсуждение результатов. Поскольку размеры моделей антенн во всем рассматриваемом диапазоне частот не превышают половины длины волны, то это малоразмерные слабонаправленные антенны. В этом случае наиболее важной их характеристикой является входной импеданс. Анализ частотных зависимостей импеданса на входе антенны в режиме излучения позволяет оценить ее диапазонные свойства. Приводимые ниже графики (рис. 3) отображают указанные частотные зависимости действительной (рис. 3, а) и мнимой (рис. 3, б) частей входного импеданса, которые построены для второй и третьей итераций фракталов с параметром α , равном 20° или 40° .

Рассмотрим частотные зависимости входного импеданса, представленные на рис. 3, а именно: положения областей вблизи резонанса ($\text{Im}Z \cong 0$) и значения действительной части входного импеданса ($\text{Re}Z$) при резонансе. На данных графиках приняты следующие условные обозначения: кривым 1 (2-я итерация) и 2 (3-я итерация) соответствует параметр $\alpha = 20^\circ$, кривым 3 (2-я итерация) и 4 (3-я итерация) – параметр $\alpha = 40^\circ$, линейной щели соответствует кривая 5.

На этих графиках видно, что во всех случаях частота первого (низшего, аналогичного резонансу параллельного колебательного контура) менее 1 ГГц – резонансной частоты предельно узкой полуволновой щели. Одной из причин этого является то, что для Δ -фрактальных щелей суммарная длина отрезков кривой, образующей ее конструкцию, превышает $0,25\lambda_0$. Другая причина в том, что сами щели не являются предельно узкими ($t = 0,01\lambda_0$).

На каждом из этих графиков замечены такие особенности:

- с увеличением номера итерации резонансные частоты возрастают;
- резонансные явления в случае Δ -фрактальных щелей, по сравнению с линейной щелью, более выражены, в особенности при малом значении параметра, что особенно заметно при резонансе «параллельного» типа.

В целом можно констатировать, что возможность уменьшения продольного размера Δ -фрактальных щелевых элементов, по сравнению с полуволновой щелью, достигается за счет определенного увеличения их поперечных размеров.

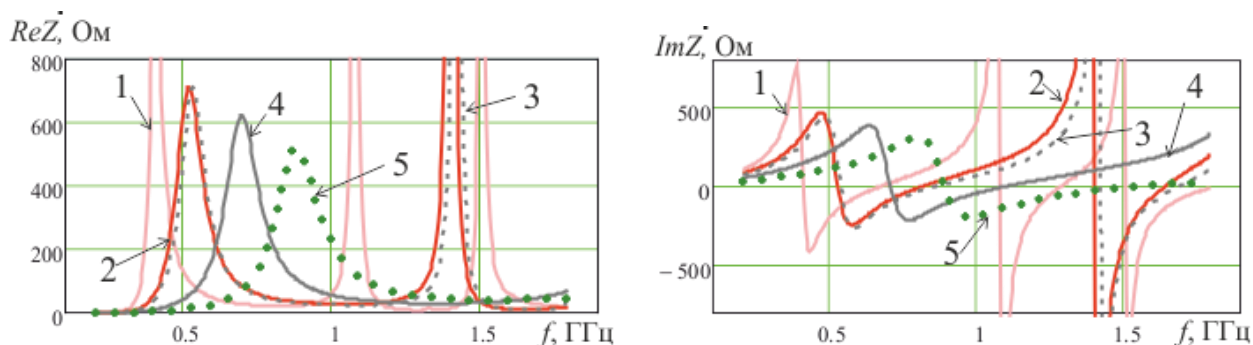


Рисунок 3 – Частотные зависимости импеданса в точках питания

На рис. 4, а приведены частотные зависимости КСВ на входе антенных элементов, построенные для случая, когда сопротивление нагрузки на входе было чисто активным и равным входному импедансу на частоте второго («последовательного») резонанса. Обозначения здесь такие же как и на рис. 3, при этом кривой 1 соответствует $R_{вх} = 18$ Ом; кривой 2 – $R_{вх} = 33$ Ом; кривой 3 – $R_{вх} = 39,2$ Ом; кривой 4 – $R_{вх} = 39$ Ом; кривой 5 – $R_{вх} = 43$ Ом.

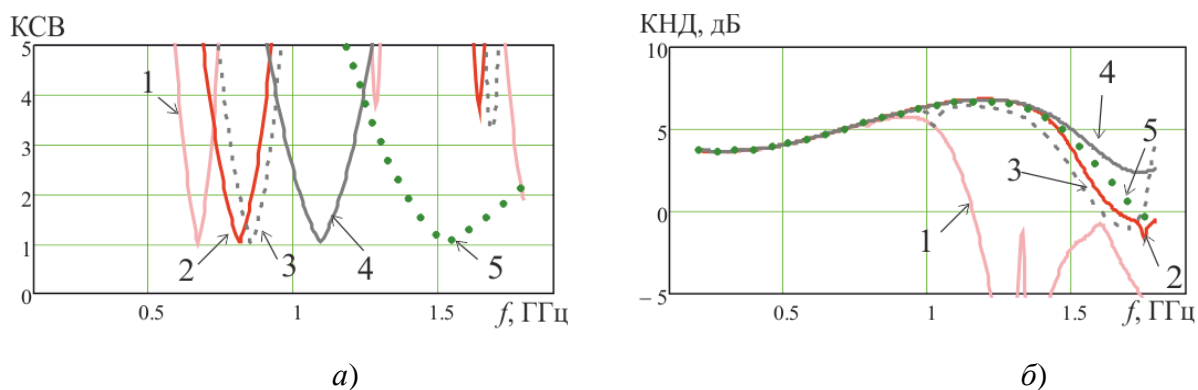


Рисунок 4 – Частотные зависимости при КСВ (а), а также КНД (б)

Здесь можно отметить особенности, касающиеся ширины полосы частот в которой $КСВ \leq 2$ и частот последовательного резонанса:

- для Δ -фрактального элемента ширина полосы растет при увеличении как порядка итерации, так и углового параметра α , однако она всегда меньше чем для линейной щели;
- дальнейшее увеличение порядка итерации приблизит физические размеры фракталов к размерам щели, что приведет к совмещению частотных характеристик и, в том числе, резонансных частот всех рассматриваемых антенных элементов.

Рис. 4, б иллюстрирует частотные зависимости максимального КНД по направлению нормали к поверхности экрана. Видно, что на частотах ниже 1 ГГц различия между частотными зависимостями КНД всех исследуемых антенных элементов незначительны, а с ростом порядка итерации эти различия становятся малыми и на более высоких частотах. Можно сказать, что в резонансных областях направленные свойства фрактальных щелей и линейной щели совпадают.

В табл. 1 приведены значения параметров исследуемых антенных элементов, таких как частота второго («последовательного») резонанса f_p , входное сопротивление на частоте f_p , относительная ширина полосы частот ($\Delta f\% = (f_{\max} - f_{\min}) * 100 / f_p$) по уровню КСВ = 2, сдвиг ($df_p\%$) резонансной частоты относительно 1 ГГц, смещение ($\delta f_p\%$) резонансной частоты относительно резонанса линейной щели.

Из этих данных следует, что, по сравнению с линейной щелью, Δ -фрактальные щели имеют примерно в два раза меньшую полосу частот и пониженные примерно на 28...56 % резонансные частоты. Последний фактор обеспечивает малоразмерность антенны, способствуя уменьшению продольного размера фрактальных щелей по сравнению с линейной щелью.

Таблица 1 – Параметры щелевых антенн

Параметры антенных элементов	Линейная щель	Фрактальный щелевой элемент			
		$\alpha = 20^\circ$		$\alpha = 45^\circ$	
		итерация 2-го порядка	итерация 3-го порядка	итерация 2-го порядка	итерация 3-го порядка
f_p , ГГц	1,52	0,67	0,81	0,86	1,09
$\Delta f\%$	25	9,6	12	12	14
$R_{вх}$, Ом	43	18	33	30,2	39
$df_p\%$	52	-33	-19	-14,3	9
$\delta f_p\%$	1	-56	-47	-44	-28,2

Характер распределения поверхностной плотности тока на экране можно наблюдать на рис. 5, где интенсивность изображения и его цвет отображают его относительную амплитуду тока.

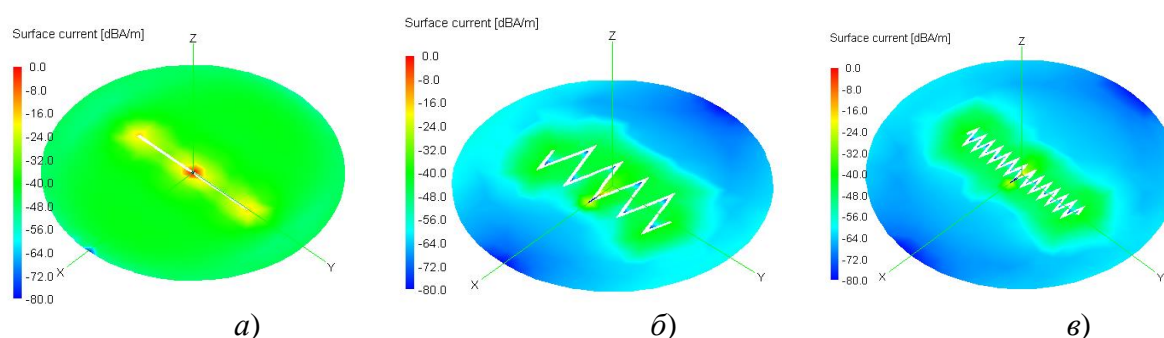


Рисунок 5 – Распределения поверхностных токов на экране:
 а) линейная щель; б) Δ -фрактальная щель 2-я итерация;
 в) Δ -фрактальная щель 3-я итерация

Здесь можно отметить тот факт, что в случае линейной щели относительная амплитуда токов примерно равна -30 дБ и практически постоянна по всему экрану, в то время как для фрактальных щелей распределение тока неравномерно и, например, в направлении оси x (т.е. по нормали к продольной оси щелевого элемента) амплитуда тока около -80 дБ. Это может предоставить определенное преимущество в Δ -фрактальной щелевой антенной решетке, уменьшая степень взаимного влияния близкорасположенных элементов.

Все перечисленные выше свойства указывают на возможность создания и применения в практических конструкциях (в том числе – обладающих малым аэродинамическим сопротивлением) щелевых Δ -фрактальных антенных элементов относительно малых размеров.

Основываясь на полученных результатах можно наметить возможные направления дальнейших исследований – это создание на основе щелевых Δ -фрактальных элементов компактных низкопрофильных излучателей и антенных решеток.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы; пер. с англ. / Мандельброт Б. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
2. Falconer K. J. Fractal geometry: mathematical foundations and applications. – Chichester: Wiley, 1990.
3. Божокин С. В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
4. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов / А.Д. Морозов. – Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
5. Potapov A. A. "Fractals, Scaling and Fractional Operators in Radio Engineering and Electronics: Present State and Development." Journal of Radio electronics. №1, (2010): Web <<http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.html>>.
6. Цалиев Т. А. Электродинамические характеристики фрактальных диполей / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2012. – № 2. – С. 3–15.
7. 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.
8. Слюсар В. И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн [Электронный ресурс] / В.И. Слюсар // Электроника НТБ. – 2007. – №. 5. – Режим доступа: www. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/593>.
9. Цалиев Т. А. Линейные Δ -фракталы и электродинамические характеристики фрактальных монополей / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2014. – № 2. – С. 8-15. – Режим доступа: www. URL: http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/820.

REFERENCES:

1. Mandelbrot, B. B. The fractal geometry of nature. New York: Freeman, 1983. Print.
2. Falconer K. J. Fractal geometry: mathematical foundations and applications. Chichester: Wiley, 1990.
3. Bozhokin, S.V., Parshin D.A. Fractals and multifractals. Izhevsk: NIC "Regular and Chaotic Dynamics", (2001).
4. Morozov, A.D. Introduction to the theory of fractals. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Science, (2002).
5. Potapov, A. A. "Fractals, Scaling and Fractional Operators in Radio Engineering and Electronics: Present State and Development." Journal of Radio electronics. №1, (2010): Web <<http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.html>>.
6. Tsaliev, T.A. "The electrodynamic characteristics of fractal dipoles." Proc. of the O.S. Popov ONAT "Information Science and Communication" №2 (2012): 3–15.
7. 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.
8. Slyusar, K. J. "Fractal Antenna. Fundamentally New Type of "broken" Antennas." Electronics NTB No. 5 (2007): Web. <<http://www.electronics.ru/journal/article/593>>.
9. Tsaliev, T.A. "Linear Δ -fraktals and the electrodynamic characteristics of fractal monopole." Proc. of the O.S. Popov ONAT "Information Science and Communication" № 2 (2014): 8–15. Web. <http://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/820>.