

## АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ АНТЕННЫ-АППЛИКАТОРА

### Введение

Создание антенн-аппликаторов для медицинского применения – задача специфическая, требующая применения нестандартных инженерных решений. Значительные трудности возникают, например, при конструировании антенн-аппликаторов для целей радиотермометрии биологических объектов. Если абстрагироваться от чисто медицинских требований, то суть заключается в следующем. Если антенна работает на одной частоте, то радиотермометрические измерения внутренней температуры возможно проводить только с определенной глубины, соответствующей этой частоте и условиям распространения электромагнитной волны в биологическом объекте. А для того, чтобы получить профиль глубинной температуры, необходимо проводить моделирование расчетным путем, решая при этом заранее некорректно поставленную задачу (используя при этом методы регуляризации решения по А.Н. Тихонову [1]). Если антенна работает на нескольких частотах, то задача по определению глубинного профиля температуры приобретает четко выраженную экспериментальную окраску и не требует решения некорректных задач, а значит результаты измерений будут достоверны. Для реализации таких систем требуются многочастотные антенны.

Большой интерес, который в последние годы вызывают фракталы [2 - 5], связан с широкой областью их применения в самых различных сферах науки и техники. Существование электродинамических фрактальных структур не вызывает сомнений, более того, стало ясно, что характеристики таких структур имеют особый характер. Среди множества типов излучателей, используемых в средствах связи, фрактальный излучатель является новым, и его характеристики в значительной мере отличаются от характеристик известных решений. В настоящее время теория фрактальных излучателей находится на этапе становления. Перспективной областью использования таких излучателей являются реконфигурируемые антенны [6].

В статье рассматривается вариант двухдиапазонной реконфигурируемой антенны-аппликатора с фрактальной излучающей системой, у которой одна из рабочих частот фиксированная, а вторая может перестраиваться в довольно широких пределах. Использование такой антенны в качестве элемента системы радиотермометрии биологических объектов позволит достаточно точно определить не только месторасположение температурной аномалии на плоскости, но и ее глубину залегания.

### Постановка задачи

Цель работы – исследование свойств фрактальной излучающей системы, которая может быть использована в реконфигурируемых антеннах-аппликаторах. Для этого вначале было проанализировано влияние угла раскрытия на резонансную частоту, входное сопротивление и направленные свойства излучателя типа «бабочка». Затем осуществлен переход к фрактальной структуре на основе модифицированного ковра Серпинского путем добавления вырезов в излучающую систему типа «бабочка» и оценено влияние формы вырезов и угла раскрытия излучателя на частотные характеристики и направленные свойства такой структуры, исследовано влияние разрывов на характеристики излучателя. Также было проанализировано влияние формы и размеров вырезов второго порядка на частотные характеристики излучателя такого типа. Для решения поставленной задачи был выбран метод конечных разностей во временной области (finite-difference time-domain (FDTD) method) [7], который базируется на представлении моделируемого объема в виде совокупности некоторых элементарных ячеек. В настоящее время данный метод является одним из наиболее перспективных для решения электродинамических задач, обладающих достаточной универсальностью.

## Анализ излучателей типа «бабочка»

В качестве исходного варианта выбран широкополосный вибратор в виде «бабочки» (рис. 1) и определены его частотные свойства в зависимости от угла раскрыва  $\alpha$ .

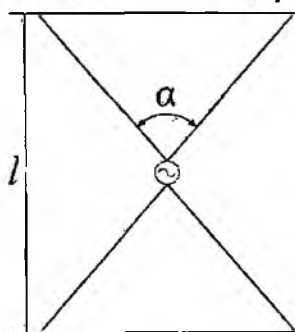


Рис. 1

Для анализа такой топологии выбраны следующие параметры сетки FDTD:  $\Delta x = 0,4$  мм,  $\Delta y = 0,4$  мм и  $\Delta z = 0,4$  мм, что позволяет рассчитывать частотные зависимости модуля коэффициента отражения и входного сопротивления излучателя вплоть до частоты 75 ГГц. Размер  $l$  выбран равным 30 мм. Полуволновый симметричный вибратор с такими размерами имеет резонансную частоту около 5 ГГц. Были рассчитаны частотные характеристики излучателей для трех случаев –  $\alpha = 30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$ .

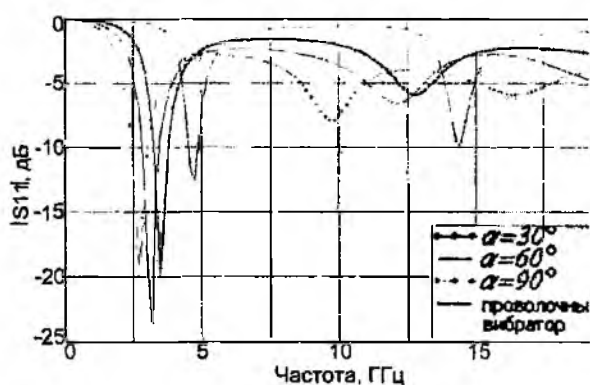


Рис. 2

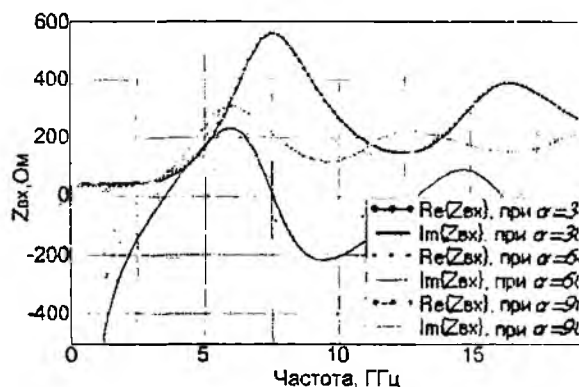


Рис. 3

На рис. 2 и 3 представлены частотные зависимости модуля коэффициента отражения и входного сопротивления. Здесь также для сравнения приведены результаты расчета частотных характеристик симметричного проволочного вибратора той же длины  $l$ . Получены резонансные частоты, равные 3,5; 3,17 и 2,7 ГГц для углов раскрыва  $\alpha = 30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно. Как и следовало ожидать, основной резонанс смещается вниз по частоте с увеличением угла раскрыва  $\alpha$  вследствие увеличения эквивалентной длины вибратора за счет емкости верхней кромки (аналогично укорачивающей емкости симметричного вибратора). Как видно из рис. 2 и 3, минимум  $|S_{11}|$  находится вблизи последовательного резонанса структуры, с увеличением

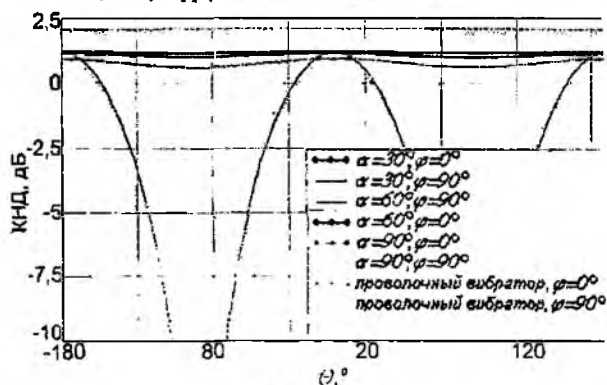


Рис. 4

угла раскрыва  $\alpha$  сглаживается частотная зависимость мнимой и действительной части входного сопротивления, что, в свою очередь, говорит об увеличении ширины полосы пропускания. Последовательные резонансы более высокого порядка являются менее выраженными и их частоты практически кратны частоте основного резонанса, т.е. определяются общей длиной этого вибратора и ими нельзя варьировать. Анализ направленных свойств излучателей на резонансных частотах показал, что с увеличением угла раскрыва  $\alpha$  уменьшается

коэффициент направленного действия (КНД) излучателей (рис. 4).

Перейдем к анализу фрактальных излучателей на основе ковра Серпинского. Исследуем возможность изменения диапазонных свойств за счет включения в их структуру переключающих элементов. Эти элементы могут быть в состояниях включено или выключено, что соответствует соединению или разрыву участков излучающей структуры.

## Анализ излучателей построенных на основе модифицированного ковра Серпинского

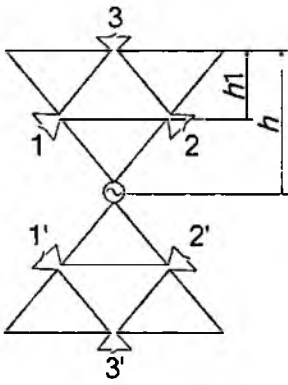


Рис. 5

Были исследованы двухчастотные излучатели, построенные на основе модифицированного ковра Серпинского (рис. 5), в которых переключатели 1, 2, 3 и 1', 2', 3' замкнуты, для характеристики формы вырезов использован коэффициент фрактальности  $k$ , определяемый как  $k = h1/h$ . При анализе данной топологии были выбраны следующие параметры сетки FDTD:  $\Delta x = 0,4 \text{ мм}$ ,  $\Delta y = 0,4 \text{ мм}$  и  $\Delta z = 0,4 \text{ мм}$ . Расчеты проводились для трех случаев –  $k = 0,33$ ,  $0,5$  и  $0,66$  для каждого угла  $\alpha = 30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$ . Результаты расчета частотных зависимостей модуля коэффициента отражения при разных значениях  $k$  и  $\alpha$ , приведенные на рис. 6 – 8 совместно с результатами, полученными при расчете излучателей типа «бабочка» и проволочный полуволнового вибратора, показали, что с появлением выреза помимо первого резонанса, частота которого остается неизменной, более отчетливо

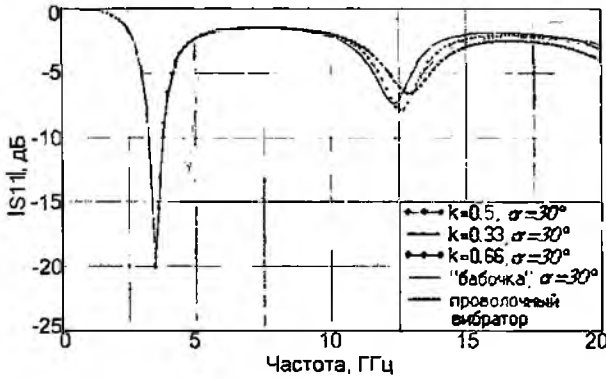


Рис. 6

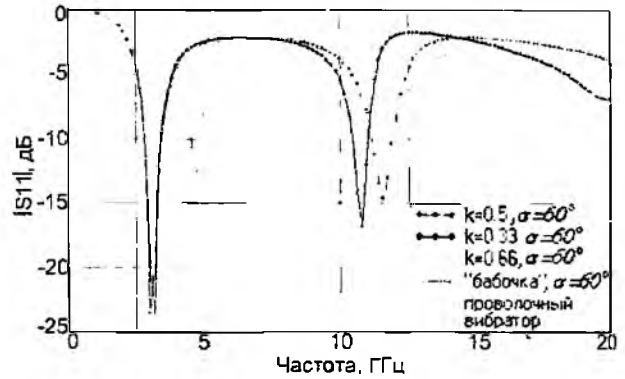


Рис. 7

проявляется и второй резонанс, частотой которого можно варьировать за счет изменения угла при основании  $\alpha$  и коэффициента фрактальности  $k$ , причем, чем больше  $\alpha$ , тем в большем диапазоне можно изменять эту резонансную частоту.

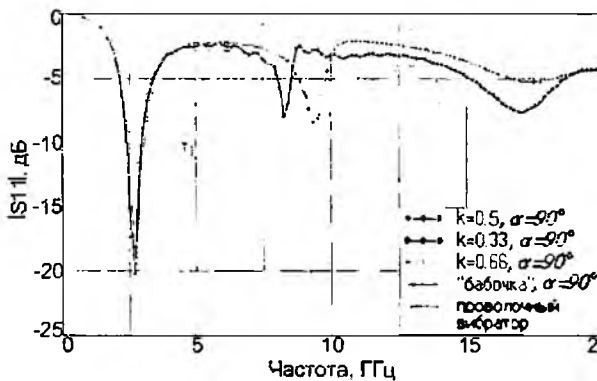


Рис. 8

Результаты анализа направленных свойств рассматриваемых излучателей на резонансных частотах показали, что форма угловых зависимостей КНД излучателей не меняется (исключением является излучатель с параметрами  $\alpha = 90^\circ$  и  $k = 0,33$ ), для излучателей с одинаковым углом раскрыва  $\alpha$  увеличение коэффициента фрактальности  $k$  приводит к снижению уровня КНД, что обусловлено уходом резонанса вниз по частоте с увеличением коэффициента фрактальности.

## Анализ влияния разрывов в узлах соединения резонирующих элементов

Анализ структуры на основе модифицированного ковра Серпинского, в котором последовательно разрывались связи между участками излучателя (рис. 9), был проведен на примере излучателя с параметрами  $\alpha = 60^\circ$  и  $k = 0,5$ . Габаритные размеры излучателя остались такими же, как и у излучателя, рассмотренного ранее, ширина разрыва была сделана равной размеру ячейки сетки FDTD, т.е.  $0,4 \text{ мм}$ . На рис. 10 и 11 приведены частотные зависимости модуля коэффициента отражения и входного сопротивления для такого излучателя.

В результате частотного анализа было определено:

а) в случае с двумя разрывами (рис. 9, а) излучатель имеет два последовательных резонанса, причем частота второго резонанса значительно ниже по сравнению со второй резонансной частотой для случая излучателя без разрывов.

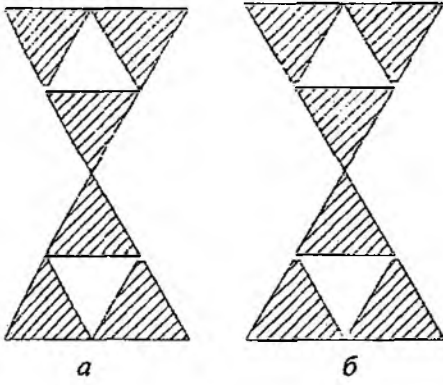


Рис. 9

Из результатов, представленных на рис. 10, видно, что добавленные вырезы сблизили резонансы по частоте, тем самым увеличив крутизну зависимости мнимой части входного сопротивления от частоты, что уменьшает ширину полосы пропускания;

б) при наличии четырех разрывов (рис. 9, б) излучатель имеет один резонанс, расположенный выше по частоте относительно первого резонанса соответствующей структуры без вырезов (рис 10). Это свидетельствует о незначительной взаимосвязи между отключенными треугольниками, и как следствие, об уменьшении электрической длины вибратора, приводящему к увеличению резонансной частоты.

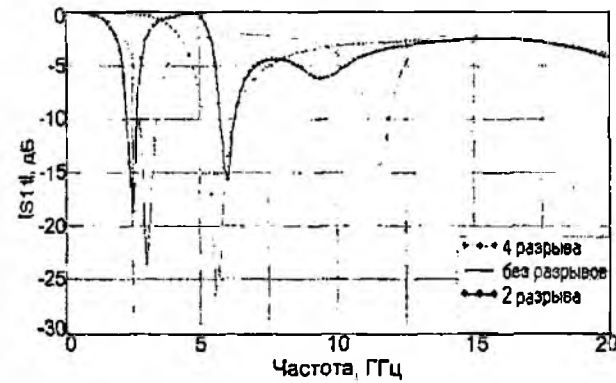


Рис. 10

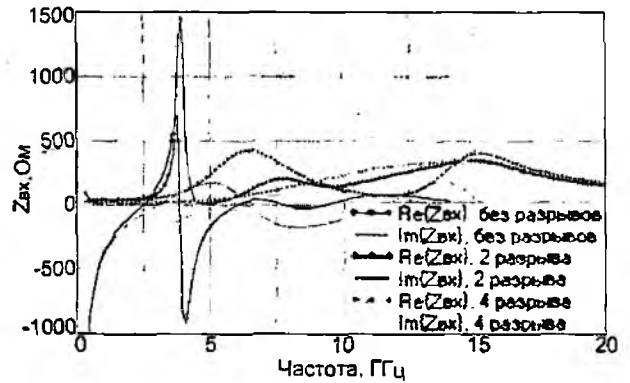


Рис. 11

Был также проведен анализ излучателей, выполненных в виде модифицированного ковра Серпинского с двумя вырезами, для трех случаев –  $k = 0,33, 0,5$  и  $0,66$  для каждого угла  $\alpha = 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$ . Полученные частотные зависимости модуля коэффициента отражения представлены на рис. 12–14 для углов  $\alpha = 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно. Результаты расчета угловых зависимостей КНД излучателей показали, что их форма остается практически неизменной при любых значениях параметров  $k$  и  $\alpha$ .

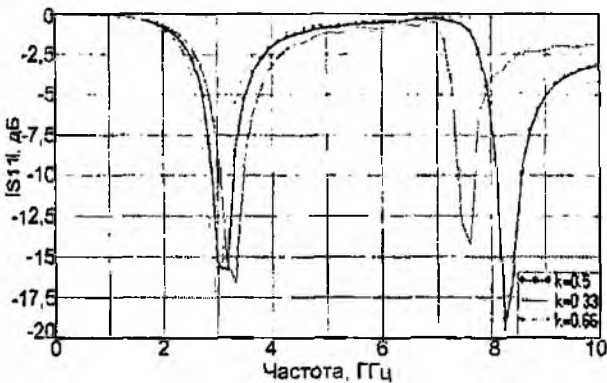


Рис. 12

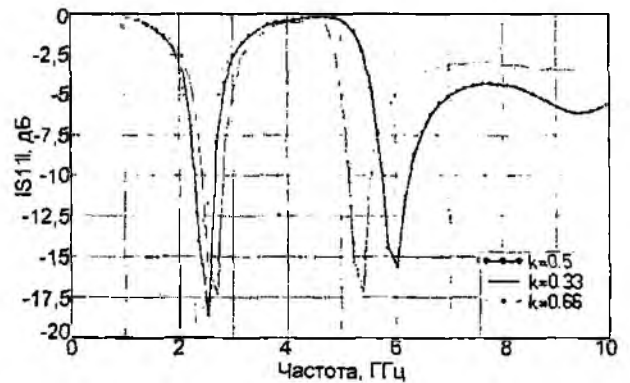


Рис. 13

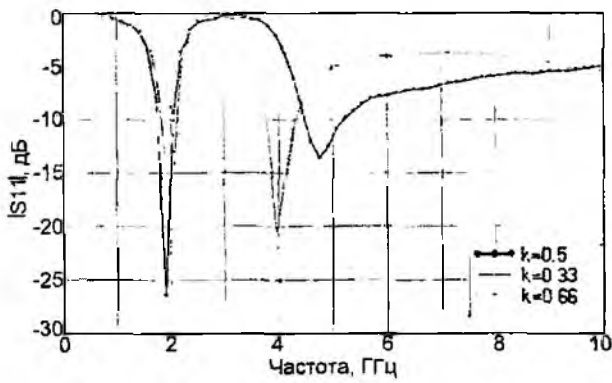


Рис. 14

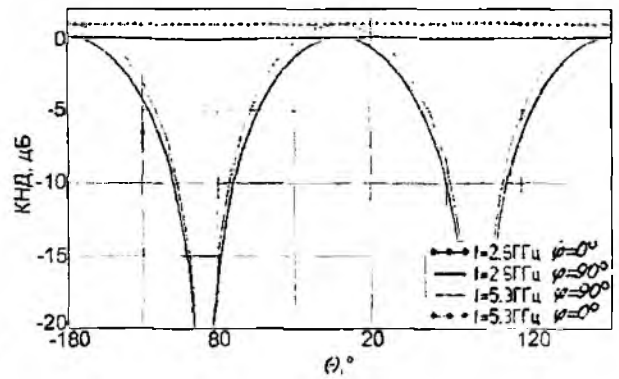


Рис. 15

На рис. 15 представлена угловая зависимость КНД излучателя при  $\alpha = 30^\circ$  и  $k = 0,33$  (кривые с точками соответствуют плоскости постоянных углов  $\varphi = 0^\circ$ , а непрерывные кривые – плоскости постоянных углов  $\varphi = 90^\circ$ ). Таким образом, переключение конфигураций излучающей структуры расширяет диапазон перестройки частоты второго резонанса.

### Анализ влияния вырезов второго порядка на частотную характеристику излучателя

При анализе излучателей, построенных на основе модифицированного ковра Серпинского с добавлением вырезов второго уровня (рис. 1, б), было исследовано влияние этих вырезов на частотные характеристики структуры. Расчеты были выполнены на основе топологии с параметрами  $\alpha = 60^\circ$  и  $k = 0,33$ . Было определено, что дополнительные вырезы не влияют на частоты первых двух резонансов (рис. 17). В структурах, изображенных на рис. 16, б и рис. 16, г появляется третий резонанс, обусловленный большим вырезом, резонансная частота которого определяется периметром выреза.

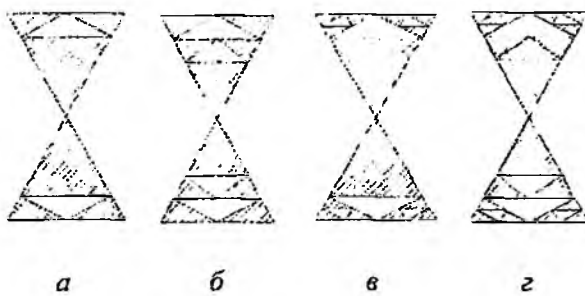


Рис. 16

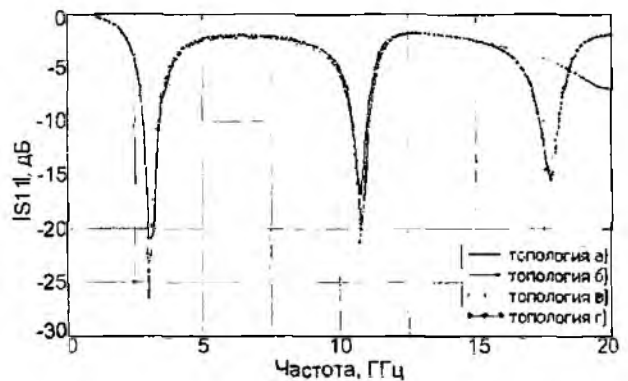


Рис. 17

### Заключение

На основе излучателей типа «бабочка» был произведен переход к фрактальной структуре модифицированного ковра Серпинского путем добавления вырезов в излучатель. Как было показано, добавление вырезов в излучатель приводит к появлению более явно выраженного второго резонанса, причем первая резонансная частота остается практически неизменной. Вторая резонансная частота определяется периметром выреза – чем больше периметр выреза, тем ниже вторая резонансная частота. При этом чем больше угол раскрытия, тем в большем диапазоне можно изменять частоту второго резонанса за счет изменения периметра выреза. Исследования структуры на основе модифицированного ковра Серпинского, в которой были реализованы различные варианты включения элементов излучателя данного типа, показали, что такая структура также имеет два последовательных резонанса, причем

частота второго резонанса значительно ниже по сравнению с излучателем без разрывов. Добавленные разрывы сблизили резонансы по частоте, тем самым увеличив крутизну частотной зависимости мнимой части входного сопротивления, что уменьшает широкополосность. Согласно приведенным результатам расчетов форма угловых зависимостей КНД излучателей остается практически неизменной для любых значений коэффициентов фрактальности и для любого угла раскрытия.

При добавлении вырезов второго порядка показано, что дополнительные вырезы не влияют на частоты первых двух резонансов. Однако, появляется третий резонанс, обусловленный вырезом второго порядка, резонансная частота которого определяется периметром выреза. Данный результат подтверждает одно из важнейших свойств излучателя на основе ковра Серпинского – данный тип излучателя является многополосным, причем количество полос напрямую зависит от количества выполненных итераций при формировании ковра Серпинского. Значения резонансных частот зависят от положения переключателей, соединяющих различные участки излучателя. Вследствие этого применение фрактальных излучателей в виде ковра Серпинского представляется весьма перспективным в качестве излучающих структур реконфигурируемых антенн, в частности, антенн-аппликаторов.

**Список литературы:** 1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с. 2. Werner D.H., Werner P.L., Church K. H. et al. Genetically engineered dual-band fractal antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001. Vol. 3. P. 628-631. 3. Anagnostou D.E., Chryssomallis M.T., Lyke J.C., Christodoulou C.G. Re-configurable Sierpinski gasket antenna using RF-MEMS switches // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 375-378. 4. Petko J.S., Werner D.H. Reconfigurable miniature three dimensional fractal tree antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 371-374. 5. Pantoja M.F., Ruiz F.G., Bretones A.R. et al. GA design of small thin-wire antennas: comparison with Sierpinsky-type prefractal antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, N 6. P. 1879-1882. 6. Сидоров Я.Г., Лучанинов А.И. Современное состояние техники реконфигурируемых антенн // Прикладная радиоэлектроника. 2008. Т. 7, №1. С. 2-10. 7. Taflov A. Computational electrodynamics: Finite Difference Time Domain Method. Boston, London: Artech House, 1995. 852 p.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.04.2009