

В.М. Семенов, В.І. Слюсар, І.І. Слюсарь

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## КВАЗИФРАКТАЛЬНА ДІЕЛЕКТРИЧНА РЕЗОНАТОРНА АНТЕНА НА ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЕПЕДА

В роботі наведено пропозиції щодо реалізації діелектричних резонаторних антен на основі квазіфрактальних структур, що характеризуються відсутністю рекурсивного повторення. В якості базового елемента запропоновано використання паралелепіпеда. З метою визначення впливу геометрії на просторово-частотні характеристики антени проведено моделювання за допомогою пакету електродинамічного моделювання Ansoft HFSS. На основі введених допущень досліджувались амплітудна частотна характеристика та коефіцієнт стоячої хвилі. На основі аналізу моделей геометрії антени визначені оптимальні варіанти компоновки центрального та периферійних елементів.

**Ключові слова:** амплітудна частотна характеристика, діаграма спрямованості, квазіфрактал, фрактал, Ansoft HFSS, DRA, VSWR.

### Вступ

Зростання ролі персональних засобів комунікацій значно підвищило інтерес до антенних систем, які здатні реалізовувати багатодіапазонність та широкосмуговість функціонування і, що не менш важливо, придатні до розміщення у корпусах будь-яких форм та розмірів.

Однак, на тлі тенденції мініатюризації телекомунікаційних систем, при зменшенні розмірів антен необхідно забезпечувати належний рівень їх характеристик. У даному випадку досить перспективними є технології діелектричних резонаторних антен (Dielectric Resonator Antenna, DRA) [1], які завдяки всеспрямованості задовольняють вимогам до мобільних пристроїв. Із діелектричних матеріалів можуть формуватися різноманітні об'ємні фігури (сфери, напівсфери, циліндри, паралелепіпеди, конуси, усічені конуси та ін.). Такі малогабаритні антени забезпечують зручне та маловитратне рішення завдань, які постають перед розробниками систем зв'язку, у першу чергу комерційних бездротових пристроїв [2].

В свою чергу, при проектуванні багатодіапазонних антен з малими габаритами, високим коефіцієнтом підсилення та всебічною направленістю використовують фрактальний підхід [3÷6]. Його перевагою є простий алгоритм формування геометрії антен. Однак, аналітичний опис параметрів антен неевклідової геометрії є досить складним через те, що їх характеристики визначаються, виходячи зі зміни геометричної форми антени або кількості елементів з задалегідь важко прогнозованими результатами [7]. Як наслідок, розрахунок фрактальних антен проводиться переважно методами чисельного моделювання.

**Мета роботи:** розробка пропозицій щодо реалізації DRA на основі фрактального підходу.

### Основна частина

Як відомо, основна відмінність фрактальних геометричних форм – це дробова розмірність, яка проявляється в рекурсивному повторенні, у зростаючому або зменшуваному масштабах, вихідних детермінованих або випадкових шаблонів антен. Згідно [5], на даний час, нараховується понад дві сотні фрактальних геометричних форм, що придатні для антенної техніки, і кількість їх зростає.

З іншого боку, питання впровадження квазіфрактальних структур [8], що характеризуються відсутністю рекурсивного повторення, в теоретичному плані поки що відпрацьовано недостатньо.

Як наслідок, в роботі запропоновано використання паралелепіпеда в якості базового елемента квазіфрактальної DRA. Спираючись на існуючий досвід проектування DRA [8], надалі, доцільно використовувати прикладний пакет електродинамічного моделювання – HFSS Ansoft [9]. При цьому, доцільно визначити вплив геометрії квазіфрактальної DRA на її просторово-частотні характеристики. Під час досліджень, з метою спрощення процесу моделювання, в якості допущень висунуті наступні положення.

1. Периферійні та центральні елементи виготовлені із однорідного діелектрика з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon = 50$ .

2. Габарити елементів DRA однакові та забезпечують квазіфрактальну структуру: основа квадрат зі стороною 25 мм, та висота 50 мм. Габарити підкладки: квадрат зі сторонами 40 мм та висотою 3 мм.

3. Живлення антени забезпечується за допомогою провідника петльового вібратора, який розташований під нижньою основою центрального елемента DRA. Діаметр провідника 0,5 мм, а діаметр петлі – 10 мм.

4. Елементи антени не перекриваються у просторі або перекриваються частково.

5. Кожен периферійний елемент має лише одну точку дотику з центральним або множини таких точок, що утворюють локальну зону, забезпечуючи симетричну компоновку антени.

6. При синтезі компоновки антени не передбачається обертання периферійних елементів уздовж поздовжньої осі.

7. Результируюча діаграма спрямованості (ДС) повинна мати мінімальний рівень пелюсток зворотного випромінювання. Розрахунки параметрів антени проводяться з кроком 50 МГц.

8. Узгодження DRA з приймально-передавальним трактом за хвильовим опором та коефіцієнтом стоячої хвилі (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) не проводиться.

Таким чином, в якості базового елемента розглядався паралелепіпед (рис. 1). Надалі, аналізувався вплив на ДС антен та їх амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) кількості периферійних елементів та їх взаємного розташування відносно центрального елемента.

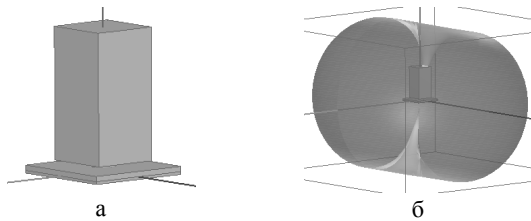


Рис. 1. Базовий елемент DRA на основі паралелепіпеда: а – схема живлення; б – ДС

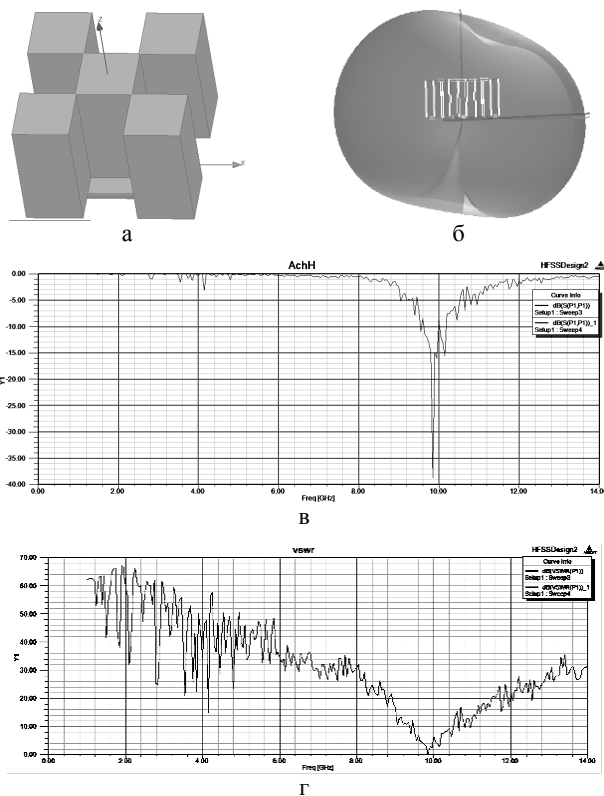


Рис. 2. Перший варіант квазіфрактальної DRA: а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

На основі введених допущень було досліджено кілька варіантів моделі DRA.

У першому варіанті (рис. 2) 4 діелектричних периферійних елементи перекривають центральний елемент на 0,5 мм. АЧХ такої антени (рис. 2, в) має виражену резонансну область між 9,6 і 10 ГГц, в якій ширина смуги пропускання антени є досить вузькою.

Як відомо, в реальних умовах величина VSWR суттєво залежить від частоти прийнятих сигналів, що легко пояснюється різними умовами узгодження антени та навантаження в широкому спектральному діапазоні.

Причиною тому є не тільки присутність реактивної складової внутрішнього опору антени, але й зміна самого активного компонента внутрішнього опору із частотою, викликана відмінностями в умовах протікання наведених струмів різної частоти по поверхні приймальної антени.

Чим вище частота струмів, тем менше вони проникають углиб провідного середовища, а саме від площі поперечного перетину провідника залежить, в остаточному підсумку, його провідність.

Тому, з величиною VSWR пов'язано один з методів визначення смуги пропускання антенної системи.

Згідно з таким підходом, під терміном «смуга пропускання антени» розуміють діапазон частот прийнятого сигналу, у межах яких величина VSWR не перевищує заданого рівня.

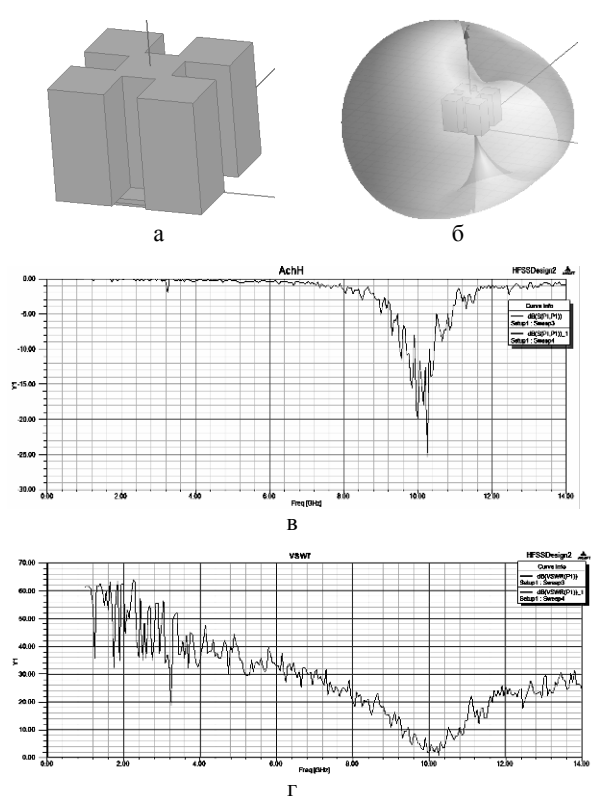


Рис. 3. Другий варіант квазіфрактальної DRA: а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

Слід також урахувати, що в якості VSWR при розрахунках смуги пропускання фігурує його інтегральне значення для всієї антенної конструкції. Справа в тому, що величина VSWR не є фіксованою для всіх ділянок антени та може мати істотні зміни, відповідно до варіації імпедансу антени в різних її точках, де проводяться відповідні виміри.

Другий варіант дослідженої конструкції містить 5 елементів зі взаємним розташуванням відповідно до рис. 3. У порівнянні з рис. 2, а, периферійні елементи перекривають кути центрального паралелепіпеда на 5 мм. Порівнявши отримані результати, нескладно

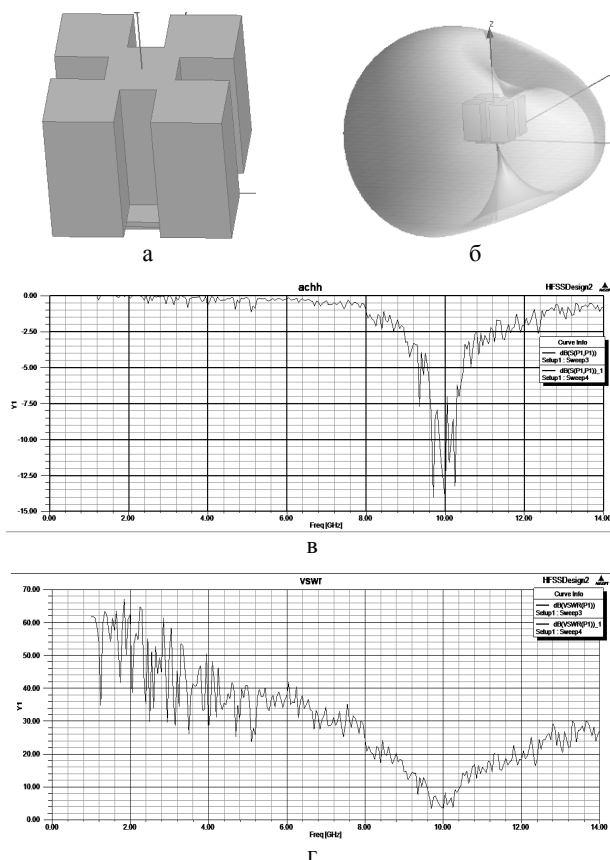


Рис. 4. 3-й варіант квазіфрактальної DRA:  
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

Разом з тим, досить великий крок по частоті при розрахунках (50 МГц) та відсутність узгодження DRA з приймально-передавальним трактом не дозволили на даному етапі отримати більш виразну картину розподілу резонансів. Однак, у відповідності з тлумаченням [10], у даному випадку доволі чітко відстежуються додаткові резонанси, які обумовлені зовнішніми габаритами квазіфрактальної основи антени, що сформовані бічними елементами.

Як і слід було очікувати, розширення смуги пропускання при зростанні перекриття паралелепіпедних елементів не може продовжуватися монотонно. Про це засвідчив наступний, 4-й варіант DRA, який відрізняється більш глибоким накладанням периферійних паралелепіпедів на центральний –

встановити, що збільшення занурення зовнішніх елементів антенної конструкції у центральне тіло призводить до розширення смуги пропускання антени через появу додаткових резонансів. Такий ефект цілком відповідає явищу, описаному в [10] на прикладі квазіфрактальної друкованої антени.

У 3-му варіанті DRA центральний елемент перекривається бічними елементами вже на 6 мм (рис. 4). У порівнянні з першим і другим варіантами, ширина смуги пропускання антени ще більше розширюється, оскільки додаткові резонанси розходяться на більшу відстань за частотою.

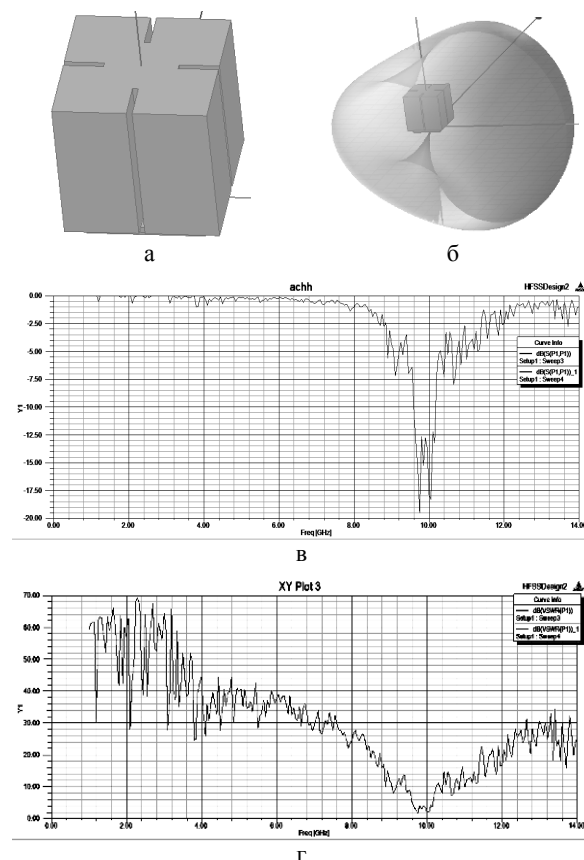


Рис. 5. 4-й варіант квазіфрактальної DRA:  
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

11,5 мм (рис. 5). Смуга пропускання АЧХ антени, при цьому, помітно зменшилася, оскільки інтервал за частотою між додатковими резонансами суттєво скоротився.

В даному випадку, на рівні -12,5 дБ смуга робочих частот перевищує 550 МГц у діапазоні 9,6÷10,2 ГГц. Таким чином, ретельно підбираючи інтервал взаємного накладання елементів DRA можливо віднайти компромісне рішення, яке задовольнить вимогам до максимально можливої смуги робочих частот. Відповідна оптимізаційна задача може бути вирішена і аналітично, однак використання пакету HFSS для цього є більш простим рішенням.

Стосовно наведених зображень 3D діаграм спрямованості слід вказати, що в усіх розглянутих

випадках вони відповідають граничним межах досліджуваного частотного діапазону.

Окрім аналізу впливу варіації конструктивного розташування паралелепіпедів у горизонтальній площині, в рамках описуваного дослідження було вивчено також вплив вертикального зсуву периферійних елементів відносно центрального тіла антени.

Модель антени у варіанті, наведеному на рис. 6, також містить 5 елементів, 4 з яких розташовані зверху центрального тіла. Із графіків видно, що результати подібні до 1-го варіанту розглянутої вище мо-

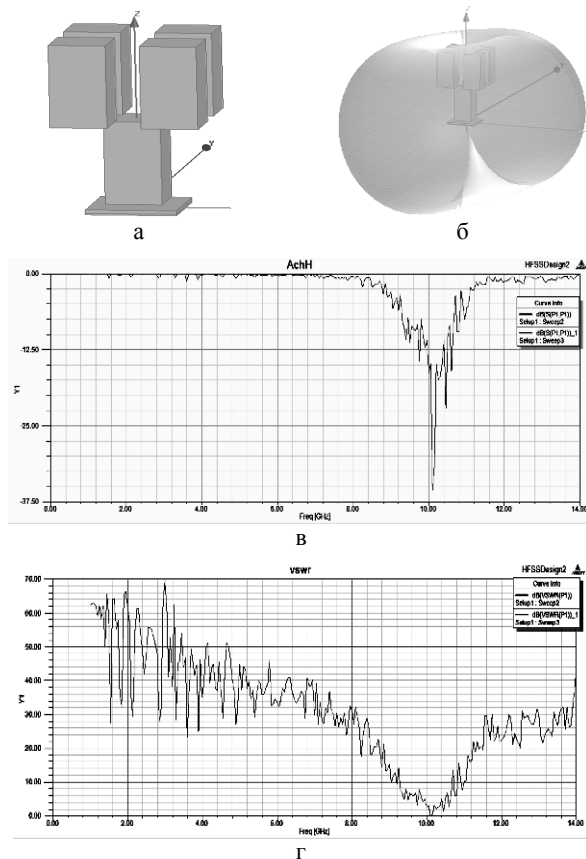


Рис. 6. 5-й варіант квазіфрактальної DRA:  
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

Порівняно з попередньою моделлю, діапазон робочих частот розширився. Чітко виражені перший та другий частотні резонанси мають майже однакові пікові значення.

Проаналізувавши розглянуті моделі антен, можливо підвести перший підсумок: розташування елементів антени, як і очікувалося, має значний вплив на її ДС та АЧХ.

При зміні розташування елементів по відношенню один до одного у вертикальній площині, дані на графіках АЧХ та ДС помітно різняться. Обґрунтованою можна вважати умову розташування всіх елементів у горизонтальній площині, що дозволяє отримати кращий результат і забезпечує наблизення результуючої ДС до однопроменевої.

делі: смуга пропускання АЧХ є досить вузькою, її пік приходить на другий резонанс, обумовлений габаритами зовнішніх елементів. При цьому в зоні в області тривимірної ДС антени спостерігається значний провал.

Якщо опускати бічні елементи уздовж ребер центрального паралелепіпеда, картина буде змінюватися.

Для конструкції на рис. 7 бічні елементи розміщені вище центрального паралелепіпеда на відстань у півребра відносно основи та перекривають кути центрального елемента на 5 мм.

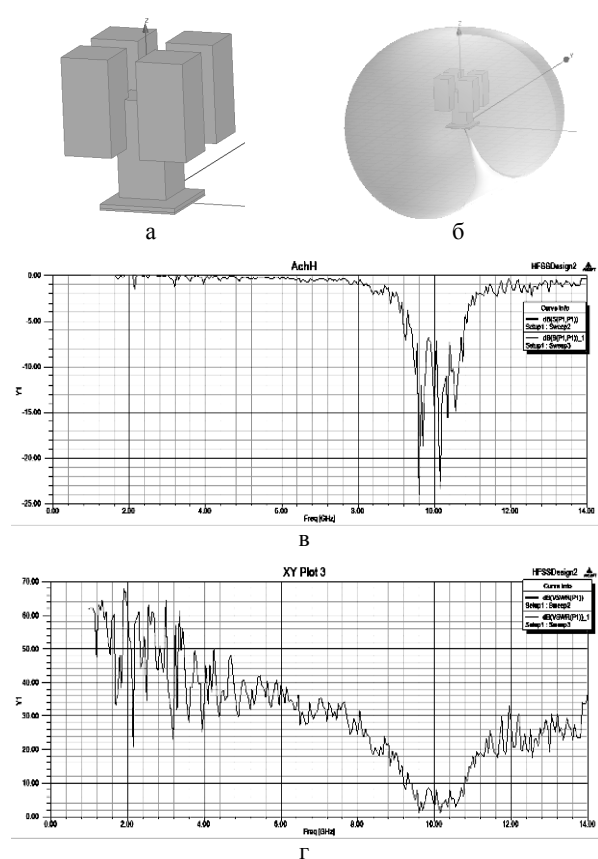


Рис. 7. 6-й варіант квазіфрактальної DRA:  
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

В цілому, отримані результати підтверджують адекватність попередньо зроблених припущень та висновків, що були зроблені в [10] для друкованих антен. Розміщення елементів DRA в горизонтальній площині дозволяє отримати більш якісні характеристики.

Як відомо, при проектуванні прагнуть зміщати резонансну частоту DRA в центр необхідної смуги пропускання.

В ідеалі, крива залежності величини VSWR по обидві сторони від резонансного мінімуму повинна бути симетричною.

Однак, на практиці, більш розповсюдженим є випадок несиметричності смуги пропускання відносно резонансу. Як наслідок, для оцінки частотних

властивостей антени доцільно використовувати поняття відносної смуги пропускання.

## Висновки

Синтезовані варіанти моделі DRA на основі квазіфрактальних структур дозволяють розширити базу технічних рішень щодо реалізації мобільних додатків. Їх застосування дає змогу задовольнити вимоги щодо багатодіапазонності та широкосмуговості.

В подальшому, необхідно визначити геометричні параметри DRA для конкретних частотних діапазонів існуючих стандартів бездротових телекомунікаційних систем.

При цьому, доцільно виконати оцінку запропонованих компоновок моделі DRA з врахуванням обертання периферійних елементів уздовж поздовжньої осі, а також введення несиметричного перекриття периферійними елементами центрального.

Також, заслуговує уваги питання використання зазначених квазіфрактальних DRA на основі метаматеріалів [11] і в інтересах реалізації технологій цифрового діаграмоутворення [12] з врахуванням взаємного впливу антенних елементів цифрових антенних решіток.

## Список літератури

1. Слюсар В.И. Диэлектрические резонаторные антенны. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 2. – С. 28-37.
2. Слюсарь І.І. Імітаційна модель квазіфрактальної 3D-антени. / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Миколенко О.С. // *Проблеми інформатизації: Тези доповідей 5-ої міжнародної НТК, 13-15 листопада 2017 р.* – Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава. – С. 80.
3. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. / Слюсар В.И. // *Радиоаматор.* – 2002. – № 9. – С. 54-56.
4. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип “ломаных” антенн. Часть 1. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 5. – С. 78-83.
5. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Часть 2. / В.И. Слюсар // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2007. – № 6. – С. 82-89.
6. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. / Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера. – 2005. – С. 498-569.
7. Слюсарь І.І. Синтез фрактальних антен в пакеті MMANA [Електронний ресурс] / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Павлюк С.Ф., Кохан Л.І., Дерій Р.С. // *Новітні інформаційні системи та технології.* – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – № 8. – Режим доступу: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PolNTU/3095>.
8. Миколенко О.С. Діелектрична резонаторна антена на основі усіченого конусу. [Електронний ресурс] / Миколенко О.С., Слюсар В.І., Слюсарь І.І. // *Новітні інформаційні системи та технології.* – 2017. – № 8. – Режим доступу: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PolNTU/3096>.
9. Банков С.Е. Расчет антен и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. / Банков С.Е., Курушин А.А. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2009. – 256 с.
10. Бабичев Д.А. Разработка и исследование микрополосковой антенны на основе фрактального подхода: дис. канд. техн. наук: 05.12.07 / Бабичев Д.А. – СПб., 2016. – 104 с.
11. Слюсарь І.І. Метаматеріали в антенах засобів мобільного зв'язку. / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Задорожний Р.Є. // *Проблеми інформатизації: Матеріали III-ої міжнародної НТК – Черкаси, ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТІГН; Полтава: ПолтНТУ, 2015.* – С. 54.
12. Слюсар В.И. Перспективные технологии антенных решеток для мобильных терминалов спутниковой связи. / Слюсар В.И. // *Технологии и средства связи.* – 2014. – № 4. – С. 64-68.

Надійшла до редколегії 19.02.2018

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.Є. Пустовойтов, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

## КВАЗИФРАКТАЛЬНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЗОНАТОРНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

В.Н. Семёнов, В.И. Слюсар, И.И. Слюсарь

В работе представлены предложения по реализации диэлектрических резонаторных антенн на основе квазіфрактальных структур, которые характеризуются отсутствием рекурсивного повторения. В качестве базового элемента предложено использование параллелепипеда. С целью определения влияния геометрии на пространственно-частотные характеристики антенны проведено моделирование с помощью пакета электродинамического моделирования Ansoft HFSS. На основе введенных допущений исследовались амплитудная частотная характеристика и коэффициент стоячей волны. На основе анализа моделей геометрии антенны определены оптимальные варианты компоновки центрального и периферийных элементов.

**Ключевые слова:** амплитудная частотная характеристика, диаграмма направленности, квазіфрактал, фрактал, Ansoft HFSS, DRA, VSWR.

## QUASIFFRACTAL DIELECTRIC RESONATOR ANTENNA BASED ON PARALLELEPIPED

V.N. Semenov, V.I. Slyusar, I.I. Sliusar

The proposals for the implementation of dielectric resonator antennas based on quasi-fractal structures which are characterized by absence of recursive repetition. Parallelepiped is proposed as a basic element. In order to determine the influence of geometry on spatial-frequency characteristics of the antenna a simulation was carried out with the Ansoft HFSS software package. Based on these assumptions, frequency response and standing-wave ratio have been examined. Based on the analysis of antenna geometry models optimal configurations of core and peripheral were identified.

**Keywords:** amplitude frequency characteristic, beam pattern, quasifractal, fractal, Ansoft HFSS, DRA.