

3. *Разработка технического обеспечения и построение автоматизированных систем диагностирования и восстановления техники связи и управления; под ред. С. П. Ксенза.*— Л.: ВАС, 1984.— 224 с.
4. *Диагностирование средств связи и управления при эксплуатационных отказах и множественных аварийных повреждениях; под ред. С. П. Ксенза.*— Л.: ВАС, 1987.— 172 с.
5. *Ксенз, С. П. Основы технической диагностики средств и комплексов связи и автоматизации управления / С. П. Ксенз.*— Л.: ВАС, 1989.— 192 с.
6. *Ксенз, С. П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств / С. П. Ксенз.*— М.: Радио и связь, 1989.— 248 с.
7. *Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации; под ред. С. П. Ксенза.*— Л.: ВАС, 1990.— 336 с.
8. *Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники; под ред. В. А. Кузнецова.*— М.: Радио и связь, 1990.— 240 с.
9. *Сакович, Л. М. Обґрунтування послідовності та кількості параметрів для метрологічного обслуговування техніки зв'язку / Л. М. Сакович, М. Ю. Яковлев // Зв'язок.— 2014.— № 1.— С. 14–19.*

Л. Н. Сакович, Ю. С. Василюк

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИКИ СВЯЗИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

На основе комплексного использования всех видов избыточности техники связи и полученных новых функциональных зависимостей показателей диагностического обеспечения ее текущего ремонта агрегатным методом от применяемого способа компоновки диагностируемых изделий формализован процесс определения минимально необходимого значения вероятности правильной оценки результата измерения диагностических параметров того или иного изделия.

Ключевые слова: техника связи; метрологические характеристики; средство измерения; ремонтпригодность; среднее время восстановления.

L. M. Sakovych, Yu. S. Vasilyuk

METHOD OF DETERMINING REQUIREMENTS FOR METROLOGICAL SPECIFICATIONS OF MEASURING DIAGNOSTIC PARAMETERS OF COMMUNICATIONS TECHNOLOGY TO ENSURE ITS MAINTAINABILITY

Based on the integrated use of all redundancy of communications technology and received new functional dependences of the diagnostic routine maintenance to ensure its aggregation method of composing articles formalized process of determining the minimum required value of probability of a correct assessment of the measurement result of diagnostic parameters object.

Keywords: communications equipment; metrological characteristics of measuring device; maintainability; average time of recovery.

УДК 621.37

В. С. НАКОНЕЧНИЙ, доктор техн. наук, ст. наук. співробітник,
Державний університет телекомунікацій, Київ

РІЗНОВИДИ ФРАКТАЛЬНИХ АНТЕН ТА ПРИКЛАДИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Подано відомості з історії створення та застосування фрактальних антен. Доведено, що фрактальні антени дозволяють отримати практично той самий коефіцієнт підсилення, що й звичайні антени, але за істотно менших габаритних розмірів, що важливо передусім для мобільних застосувань.

Ключові слова: фрактал; фрактальна антена.

Вступ

Телекомунікаційні технології стрімко входять у повсякденне життя людини. Проте постійне зростання кількості використовуваних телекомунікаційних засобів спонукає до пошуків щодо зниження їхніх розмірів, маси та енергоспоживання. Учені всього світу працюють над розв'язанням зазначених проблем, застосовуючи новітні теорії та підходи.

У зазначеному плані надзвичайно важливу роль відіграло відкриття фракталів, що привело до революції не лише в геометрії, а й у фізиці, радіоелектроніці, хімії, біології тощо. Фрактальні технології знайшли застосування в теоріях стиснення даних, фільтрації сигналів, синтезу тривимірних комп'ютерних моделей природних ландшафтів, а також, що особливо важливо, теорії антен. Адже, як показали результати імітаційного моделювання

та експериментів, фрактальні антени дозволяють отримувати практично той самий коефіцієнт посилення, що й звичайні антени, забезпечуючи водночас істотне зменшення масагабаритних параметрів апаратури.

Мета статті — подати опис фрактальних антен, застосовуваних у сучасній телекомунікаційній апаратурі, розглянути їх різновиди, характеристики та приклади використання.

Основна частина

Велике прикладне значення фрактальної геометрії у різних галузях природознавства зумовлене тим, що фрактальні форми, або фрактали, притаманні величезній кількості процесів і структур у природі. Простим прикладом природного фрактала може бути дерево, стовбур якого поділяється на дві гілки, які,

у свою чергу, розгалужуються на дві дрібніші гілки, і т. д. Образно кажучи, гілки такого дерева унаочнюють фрактальний скейлінг, або гіпотезу самоподібності: вигляд фрактальної структури об'єкта істотно не змінюється внаслідок масштабних перетворень у певному діапазоні.

Термін **фрактал** (від лат. «frangere» — ламати і «fractus» — дробовий) упровадив у науку 1975 року Б. Мандельброт, фундаментальні праці [1; 2] якого покладено в основу фрактального опису природи. Прототипом сучасних фрактальних технологій у антенній техніці стали запропоновані в середині 1960-х років логоперіодичні та спіральні конструкції.

Нині завдяки імітаційному моделюванню та експериментам встановлено, що фрактальні антени дозволяють отримати практично той самий коефіцієнт підсилення, що й звичайні антени, але за істотно менших габаритних розмірів, що передусім важливо для мобільних застосувань [3].

Серед безлічі антенних конструкцій, використовуваних сьогодні в засобах телекомунікації, фрактальні антени характеризуються принциповими конструктивними відмінностями. Практичне впровадження фрактального напрямку в антенній техніці започаткував американський інженер Натан Коен [4]. Усупереч забороні міської влади Бостона на встановлення зовнішніх антен, він замаскував антену своєї аматорської радіостанції під декоративну фігуру з алюмінієвої фольги, узявши за основу цієї фігури відому в геометрії криву Кох [4; 5].

Отримати фрактал можна, поділяючи зазначену фігуру на дедалі дрібніші об'єкти, причому такий поділ може здійснюватися нескінченно. Розглянемо процес побудови кривої Кох докладніше.

Початковий відрізок завдовжки L поділяємо на три рівні відрізки і замість центрального відрізка беремо ламану у вигляді кута рівностороннього трикутника зі стороною $L/3$ (рис. 1, а). У такий спосіб дістаємо трисегментну структуру, центральний елемент якої заміщено трикутником без основи (ітерація 1). Далі процес повторюємо з кожним сегментом окремо. Ітерація 2: на відрізках $L/3$ будуюмо трикутники зі сторонами $L/9$, на них — трикутники зі сторонами $L/27$ (ітерація 3) і т. д.

Кожний крок синтезу збільшує довжину результуючої кривої в $4/3$ раза. Утім при цьому висота фрактала не змінюється.

Як показали експерименти та математичні розрахунки, широкосмугова антена, діапазон частот якої може охопити весь радіохвильовий спектр, має бути фрактальної форми, що дозволяє зменшувати габаритні розміри антени, поліпшуючи її характеристики (рис. 1, в).

Зауважимо, що з-поміж численних фрактальних структур для антен малого розміру найбільш прийнятні фрактали Мінковського [6; 7].

Приклад фрактального перетворення Мінковського прямої дипольної антени завдовжки L , яку взято за нульову ітерацію, наведено на рис. 1, б. Застосовуючи таке перетворення до кожного відрізка, дістаємо фрактальні диполі вищих ітерацій. Оскільки резонансна частота диполя визначається його довжиною, то для збереження її незмінності при фрактальному перетворенні беремо загальну довжину $L_{\Sigma,n}$ фрактального диполя n -ї ітерації згідно з такою рівністю [8]:

$$L_{\Sigma,n} = L. \quad (1)$$

За умови

$$L_{\Sigma,n} = 3l + 2h,$$

якщо $h = \frac{1}{2}l$, а висота фрактального диполя

$$L_{\Phi,n} = \left(\frac{3}{4}\right)^n L. \quad (2)$$

Отже, з підвищенням порядку ітерації висота диполя скорочується. Саме в цьому й полягає головна перевага фрактальних антен.

Перевірку умови незмінності резонансної частоти здійснено моделюванням фрактальної ітерації 1 і 2 згідно з перетворенням Мінковського та прямокутної антени (рис. 2).

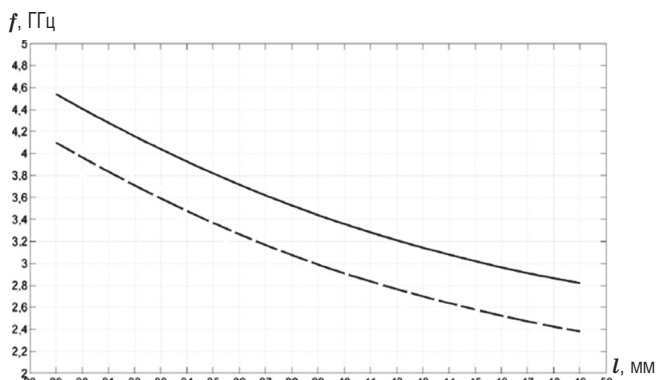


Рис. 2. Залежність резонансної частоти f для фрактальної ітерації 1 і 2 (суцільна крива) та квадратної (пунктирна крива) антен від довжини l відповідної ламаної

Як випливає з рис. 2, у разі виконання умови (1) резонансна частота f фрактальної антени ітерацій 1 і 2 одна й та сама, причому на 20% більша, ніж для квадратної антени.

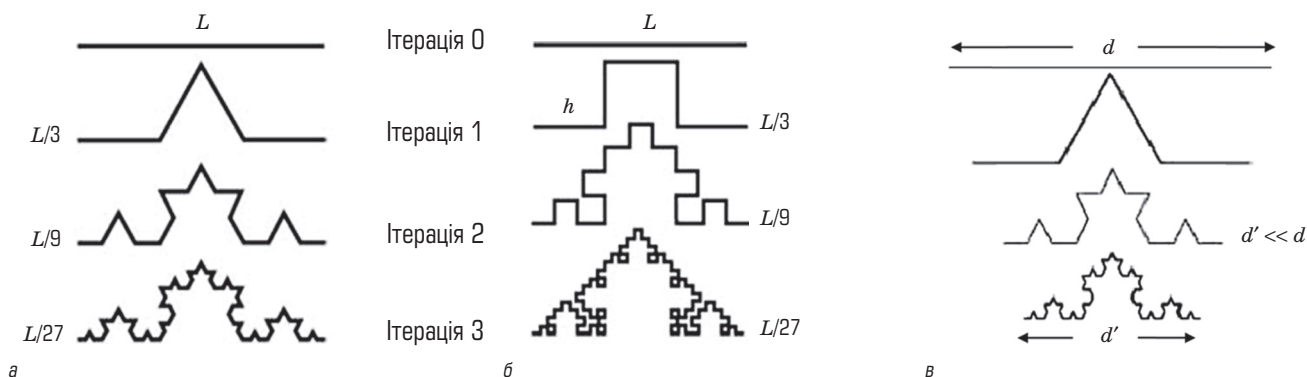


Рис. 1. Ітеративний процес побудови фрактальної фігури: а — кривої Кох; б — фрактала Мінковського; в — будь-якої кривої згідно з принципом фрактальності

Оскільки резонансна частота квадратних антен визначається умовою

$$L = 0,49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{еф}}}}, \quad (3)$$

де λ — резонансна довжина хвилі; $\epsilon_{\text{еф}}$ — ефективна діелектрична проникність середовища між антеною і поверхнею Землі, то для фрактальних антен Мінковського дістаємо емпіричне співвідношення

$$L_{\Sigma, n} = 0,6 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{еф}}}}, \quad (4)$$

яке можна використати в інженерних розрахунках.

Зауважимо, що при першому вигині прямолінійного диполя у вигляді «прямокутного солітона» його підсилення зростає. Подальші ітерації практично не впливають на коефіцієнт підсилення, тоді як діапазон робочих частот диполя розширюється, а сама антена стає набагато компактніша. Як і в разі кривої Кох, ефективні лише перші 5-6 кроків. Адже щоб згинати дріт далі, доведеться зменшувати його діаметр, підвищуючи тим самим опір антени, що призводитиме до втрати підсилення.

Традиційні рамкові антени за малих розмірів мають низький вхідний опір. Через це ускладнюється їх узгодження з живильним фідером. Натомість фрактальні технології дозволяють помітно підвищити опір рамкової антени на частотах, нижчих від резонансної, спростивши тим самим завдання її узгодження для потреб радіопеленгації та частотного моніторингу. Окрім того, ці технології дають змогу збільшити апертурну ефективність антени.

Розглянуті варіанти антен було виготовлено на базі дротяної технології. Проте знаходять застосування й фрактальні антени, отримані друкарським монтажем на діелектричній основі (рис. 3).

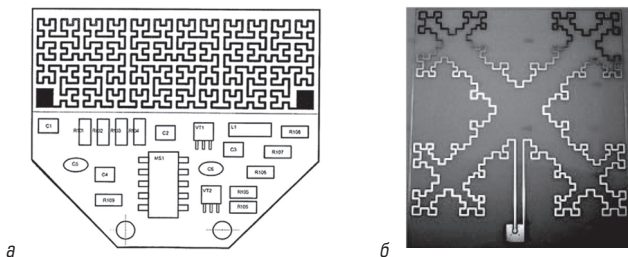


Рис. 3. Приклади фракталів Мінковського, виготовлених друкарським способом

Завдяки комплексному застосуванню фрактальних технологій можна зменшити витрати матеріалів та масу антенних систем, особливо якщо випромінювачі об'єднати в антенні решітки, знизивши їхній взаємний вплив. Інший ефект, отримуваний унаслідок компактності фрактальних випромінювачів у антенних решітках, полягає в можливості щільнішого впакування антенних елементів заради розширення сектора сканування.

До яскраво виражених багатодіапазонних фрактальних антен належать, зокрема, решето та килим Серпінського (рис. 4).

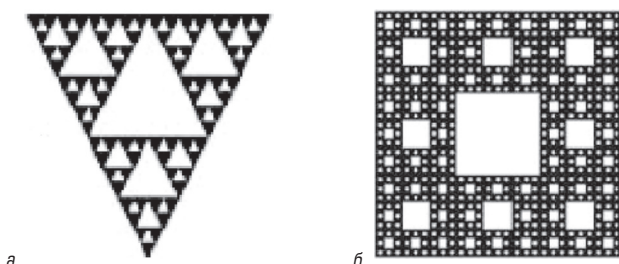


Рис. 4. Широкодіапазонні фрактальні антени: а — решето; б — килим Серпінського

Останню фігуру названо на честь польського математика В. Серпінського (1882–1969), який 1916 року побудував її, давши поштовх до впровадження відповідних фрактальних антен.

Наприклад, у стільникових радіотелефонах значного поширення набула багатодіапазонна фрактальна антена на базі килима Серпінського (рис. 5). Цю достатньо компактну антену можна не лише встановлювати на платі, а й напильовати на внутрішню поверхню корпусу. Для виготовлення таких антен, як правило, використовують фабер-технології тривимірного прототипування (фабери-пристрої, здатні поступово, шар за шаром утворювати деталь), що дозволяють прецизійно формувати мініатюрні антени будь-якої складності.

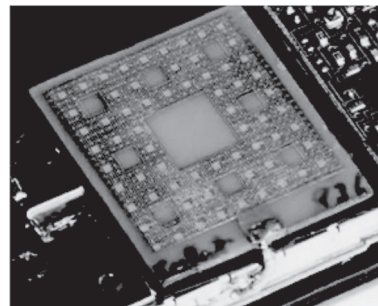
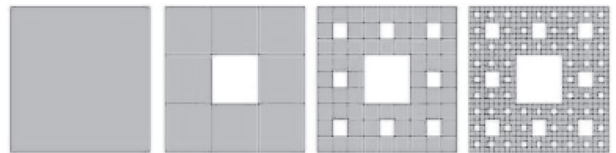


Рис. 5. Процес застосування фабер-технології

Фрактальні багатодіапазонні антени на базі килима Серпінського можна узагальнити на тривимірний випадок (рис. 6).

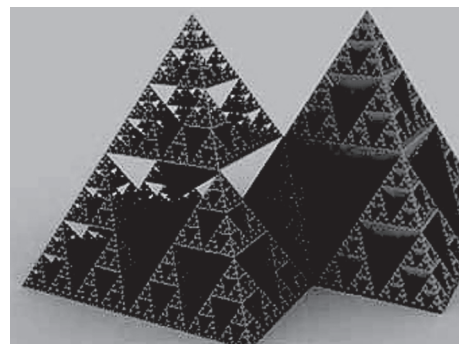
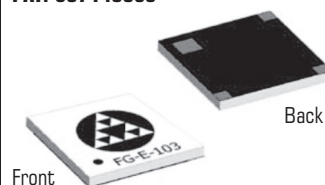


Рис. 6. Фрактальний куб, оточений фрактальними пірамідами

Фірма Fractus, яка з 2007 року спеціалізується в галузі мобільного зв'язку, користуючись рекурсивною технологією, налагодила випуск оптимізованих фрактальних антен для GPS навігації. Загальний вигляд і характеристики такої антени наведено на рис. 7.

PAT. US7148850



Frequency Range	1575 MHz
Efficiency	> 70%
Peak Gain	> 1 dBi
VSWR	< 1,5:1
Weight	0,20 g
Temperature	-40 to +85°C
Impedance	50 Ω unbalanced
Dimensions	10×10×0,9 mm

Рис. 7. Загальний вигляд і характеристики фрактальної антени для GPS навігації

Висновки

Сьогодні фрактальні антени набули практичного використання в мобільних технологіях. Їхня компактність та широкосмугові властивості зробили їх незамінними в безпроводовому зв'язку, у Bluetooth, Wi-Fi, а також у GSM стандартах. В одному гаджеті, наприклад у мобільному телефоні, смартфоні, КПК, удалося розмістити всі відповідні пристрої. У багатьох мікрохвильових установках також використовуються фрактальні антени. Відмінна робота фрактальних антен забезпечується їй у телевізійному діапазоні.

Проте поки що патентом на виробництво та впровадження фрактальних систем у антенній промисловості володіє дуже обмежена кількість компаній. Залишається сподіватися, що в найближчому майбутньому фрактальний напрямок у побудові антен набуде повсюдного впровадження, посприявши появі компактною ідеальної антени.

Література

1. **Mandelbrot, B. B.** *Les Objects Fractals: Forme, Hasard et Dimension* / B. B. Mandelbrot.— Paris: Flammarion, 1975, 1984, 1989, 1995.
2. **Mandelbrot, B. B.** *Fractals: Forme, Chance and Dimension* / B. B. Mandelbrot.— San-Francisco: Freeman, 1977.— 365 p.
3. **Слюсар, В.** Фрактальные антенны / В. Слюсар // *Радиоаматор*.— 2002.— № 9.— С. 54–56.
4. **Горобець, Ю. І.** Вступ до фізики фрактальних структур: навч. посібник / Ю. І. Горобець, А. М. Кучко.— К., 2000.

5. **Gianvittorio, J.** *Fractal Antennas: Design, Characterization, and Applications* / John Gianvittorio.— University of California, Los Angeles.— 2000.— 109 p.

6. **Werner, Douglas H.** *An Overview of Fractal Antenna Engineering Reserch* / Douglas H. Werner and Suman Ganguly // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*.— February 2003.— Vol. 45, No. 1.

7. **Investigations into Novel Multi-band Antenna Disigns** / [Ross Kyprianov, Bobby Yau, Aris Akexopoulos a. o.] // *DSTO-TN-0719*.

8. **Small Size and Dual Band of a Quadratic Koch Dipole Fractal Antenna Design** / [J. Jibrael Fawwaz a. o.] // *American Journal of Applied Sciences*.— 2008.— 5 (12).— P. 1804–1807.

9. **All Sadeq Abdulhadi Jalal.** *A New Compact Patch Antenna Design for Circular Polarization Applications Based on 3rd Iteration Minkowski-Like Pre-Fractal Geometry* // *J. Eng. Applied Sci.*— 2008.— N 3.— P. 729–734.

10. **Fractal Antenna Elements and Arrays** / [Yang X. a. o.] // *Applied Microwave and Wireless*.— May 1999.— P. 34–46.

11. **Слюсарь, В. И.** Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант / В. И. Слюсарь // *Конструктор*.— 2002.— №1.— С. 5–7.

12. **GPS chip antenna for low-cost consumer electronic devices** [Електронний ресурс].— Режим доступу:

<http://electronix.ru/forum/index.php?act=attach&type=post&id=16365>.

В. С. Наконечный

РАЗНОВИДНОСТИ ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕНН И ПРИМЕРЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Представлены сведения из истории создания и применения фрактальных антенн. Показано, что фрактальные антенны позволяют получить практически тот же коэффициент усиления, что и обычные антенны, но при меньших габаритных размерах, что весьма важно прежде всего для мобильных приложений.

Ключевые слова: фрактал; фрактальная антенна.

V. S. Nakonechny

VARIETY OF FRACTAL AERIALS AND EXAMPLES OF THEIR APPLICATION

The questions of the history of creation and application of fractal aerials are considered in the article. It is shown that fractal aerials allow to get the same amplification factor practically, what ordinary, but at less sizes, that it is important for mobile applications.

Keywords: fractal; fractal aerial.

ЗВ'ЯЗОК

Наукове видання

Редакційна обробка та коректура
О. П. Бондаренко, Т. В. Ількевич

Комп'ютерна верстка да дизайн
Г. С. Тимченко, О. Ю. Апухтіна

Підписано до друку 22.04.2015 р.
Формат 60×84/8. Друк офсетний. Папір друкарський.
Гарнітура SchoolBookC, EuropeCond. Наклад 100 прим.

Редакційно-видавничий центр
Державного університету телекомунікацій
03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7
Тел. 249-25-75
E-mail: zviaz-ok@ukr.net