

УДК 621.396

*Слюсарь І.І., к.т.н., доцент,  
Слюсар В.І., д.т.н., професор,  
Павлюк С.Ф., студент,  
Кохан Л. І., студент,  
Дерій Р.С., студент,  
Полтавський національний технічний  
університет імені Юрія Кондратюка*

## **СИНТЕЗ ФРАКТАЛЬНИХ АНТЕН В ПАКЕТІ MMANA**

*В роботі наведено результати моделювання антен на фрактальній основі. Через складність опису взаємодії антен неевклідової геометрії з радіохвилями їх синтез виконаний з використанням програми MMANA-GAL. Запропонована послідовність етапів моделювання дозволяє забезпечити багатодіапазонність і широкосмуговість. На основі проведених досліджень запропоновані рекомендації щодо практичного застосування фрактальних структур в інтересах систем і мереж 802.11x і 5G.*

***Ключові слова:** антена, діаграма спрямованості, коефіцієнт стоячої хвилі, фрактал, MMANA.*

### **Вступ**

В умовах зростання інтересу до систем 5G і поширення застосування 802.11x виникає потреба в розробці пристроїв, які забезпечують роботу в зазначених мережах. До таких пристроїв висуваються досить суперечливі вимоги щодо реалізації широкосмуговості, багатодіапазонності, та можливості реалізації OFDMA, MU-MIMO і DBF. При цьому, антени є невід'ємною частиною систем безпроводового радіозв'язку. Необхідність мінімізації габаритів антенних пристроїв призвела до застосування антен неевклідової

геометрії, серед яких слід виділити фрактальні антени [1, 2].

Враховуючі складність опису взаємодії антен неевклідової геометрії [3] з радіохвилями доцільно виконувати їх синтез із використанням прикладних пакетів шляхом математичного моделювання.

### **Основна частина**

На даний час, моделювання розглядається як необхідний та обов'язковий процес проектування та подальшого відпрацювання. Зараз існує багато програмних додатків для моделювання та проектування антен. В роботі запропоновано використання програми MMANA-GAL [4]. Вона працює в середовищі ОС Windows. Антена в MMANA-GAL описується як набір одиночних прямих проводів. Результати розрахунку виводяться у вигляді 2D і 3D діаграми спрямованості (ДС) і множини графіків-залежностей.

Обчислювальною основою MMANA (так само як і багатьох комерційних програм моделювання) є програма MININEC Ver.3, яка була створена для цілей американських ВМС в Washington Research Institute. Всі додаткові функції та інтерфейси написані відомим програмістом Makoto Mori. MMANA містить бібліотеку з інформацією про понад 200 антен.

Перевагами даної програми є безкоштовність (freeware), простота, зручний інтерфейс, можливість масштабування антени на довільну частоту, розрахунок параметрів пристрою узгодження. Однак, MMANA має деякі обмеження в моделюванні реальної землі, але не має обмежень, по взаємному розташуванню проводів.

В ході досліджень реалізовувалась така послідовність моделювання: проектування антени в MMANA-GAL на основі введених геометричних параметрів; визначення електричних параметрів; пошук (оптимізація) на їх основі базової антени; масштабування на розрахункову частоту; визначення електричних параметрів.

В якості допущень розглядались наступні положення.

1. Визначення параметрів антени проводиться без використання

пристрою узгодження у вільному просторі на основі матеріалу без втрат.

2. За замовчуванням, живлення антени здійснюється через середину центрального фрагменту антени.

3. З врахуванням поняття «еквівалентного провідного вібратору» (рис. 1), діаметр проволу ( $R$ ) дорівнює 1 мм (для мікросмужкових друкованих антен, відповідно – 2 мм), в т. ч., після процедури масштабування.

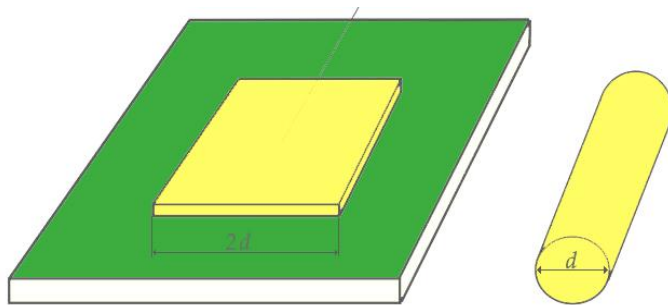


Рис. 1. Співвідношення мікросмужкового елемента та провідного вібратора

4. Смуга пропускання  $B_{\text{SWR}}$  розраховується при  $\text{SWR} = 1,99$ , що відповідає загальному прийнятому значенню:  $\text{SWR} < 2,0$ . Враховуючі імовірну несиметричність  $B_{\text{SWR}}$ , додатково розраховується її центральна частота, яка в подальшому визначає параметри пристрою узгодження:  $F_{\text{med}} = 0,5(F_{\text{min}} + F_{\text{max}})$ .

5. Коефіцієнт перекриття діапазону (Spectrum Response Ratio, SRR) дорівнює:  $\text{SRR} = F_{\text{max}} \cdot F_{\text{min}}^{-1}$ .

6. Результируюча 3D ДС є однопроменевою.

7. В якості базової вибирається антена, що має частоту першого резонансу ( $F_{\text{RES\_MMana}}$ ) при  $\text{SRR} \rightarrow \text{min}$ ,  $X \rightarrow 0$  (мніма складова  $Z_B$ ),  $R \rightarrow 50$  Ом (реальна складова  $Z_B$ ),  $F/B \rightarrow 0$ , а також див. п. 6.

8. Масштабування базової антени на розрахункову частоту виконується без врахування зсуву резонансних частот, що властиві фрактальним структурам.

В роботі, одною з базових антен визначена петля Мінковського 2-ої ітерації

(в якості ініціатора виступає квадратна рамка, а генератором є ламаної Г. Мінковського). Сутність фрактальних перетворень пояснюється рис. 2.а [5, 6]. Таким чином, квадратна рамка зі стороною  $L$  прийнята за нульову ітерацію ( $I = 0$ ). Відповідні геометричні розміри для ітерацій мають співвідношення:

- для першої ( $I = 1$ ):  $l_1 = L/4$ ,  $h_1 = l_1/2$ ;
- для другої ( $I = 2$ ):  $l_2 = l_1/4$ ,  $h_2 = l_2/2$ ,  $l_3 = h_2$ ,  $h_3 = l_3/2$ .

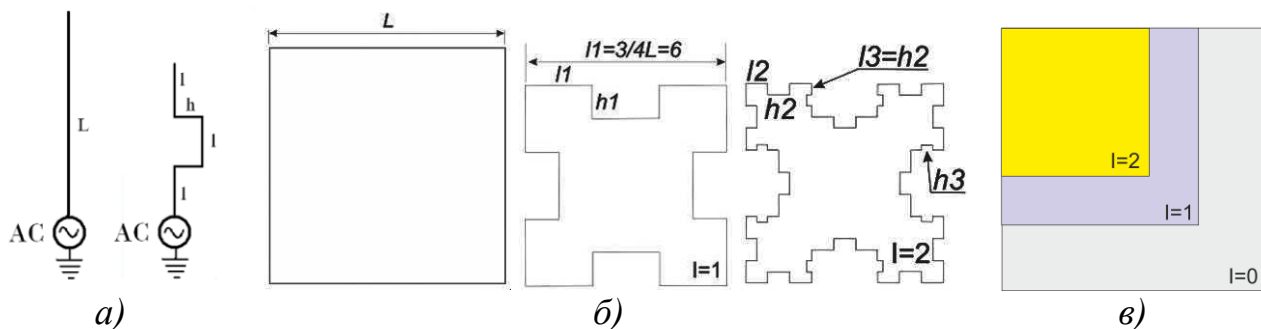


Рис. 2. Процес формування петлі Мінковського 2-ої ітерації: а) – закон фрактального перетворення на основі ламаної Г. Мінковського;

б) – послідовність формування 2-ої ітерації; в) – геометричні співвідношення перших двох ітерацій

Як наслідок, геометричні співвідношення антени (рис. 2.в) для кожної ітерації описуються виразом:

$$L_I = \left(\frac{3}{4}\right)^I L,$$

де  $I$  – номер ітерації.

Отриманий ефект мініатюризації дозволяє побудувати багатодіапазонну антену, що складається з петлі Мінковського з внутрішнім елементом, який розрахований на вищий частотний діапазон. В якості прикладу останніх, слід розглядати фрактальні структури (в т.ч., на основі рекурсивного дерева), що наведені на рис. 3. Результуючі ДС наведених структур зображено на рис. 4. Враховуючі наявність в бібліотеці програми деяких варіантів фрактальних структур, основний акцент зроблений на дослідження параметрів базових моделей антен, які зображені на рис. 5 з параметрами, що наведені в табл. 1.

Враховуючі появу обладнання для реалізації 802.11ах, в роботі наведено

результати моделювання антен № 3 і 5, що відображені на рис. 6÷9.

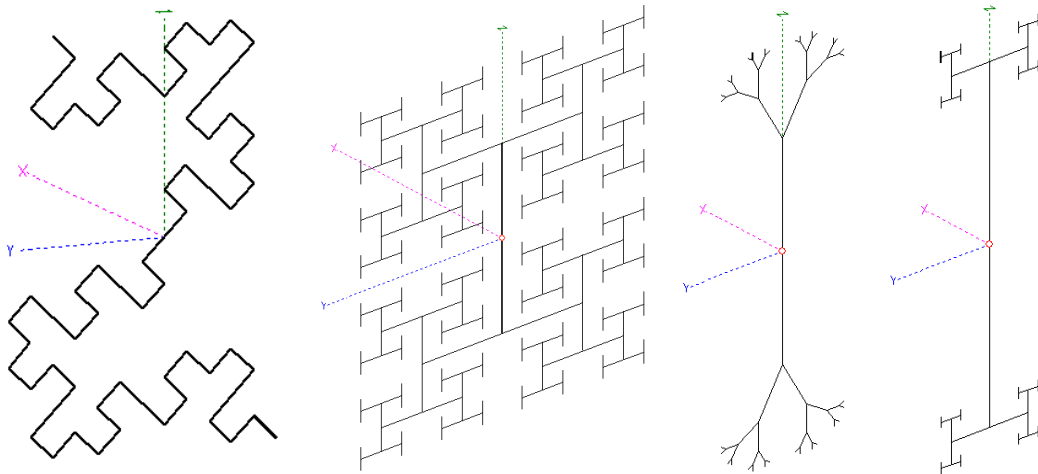


Рис. 3. Варіант внутрішнього елемента комбінованої фрактальної антени

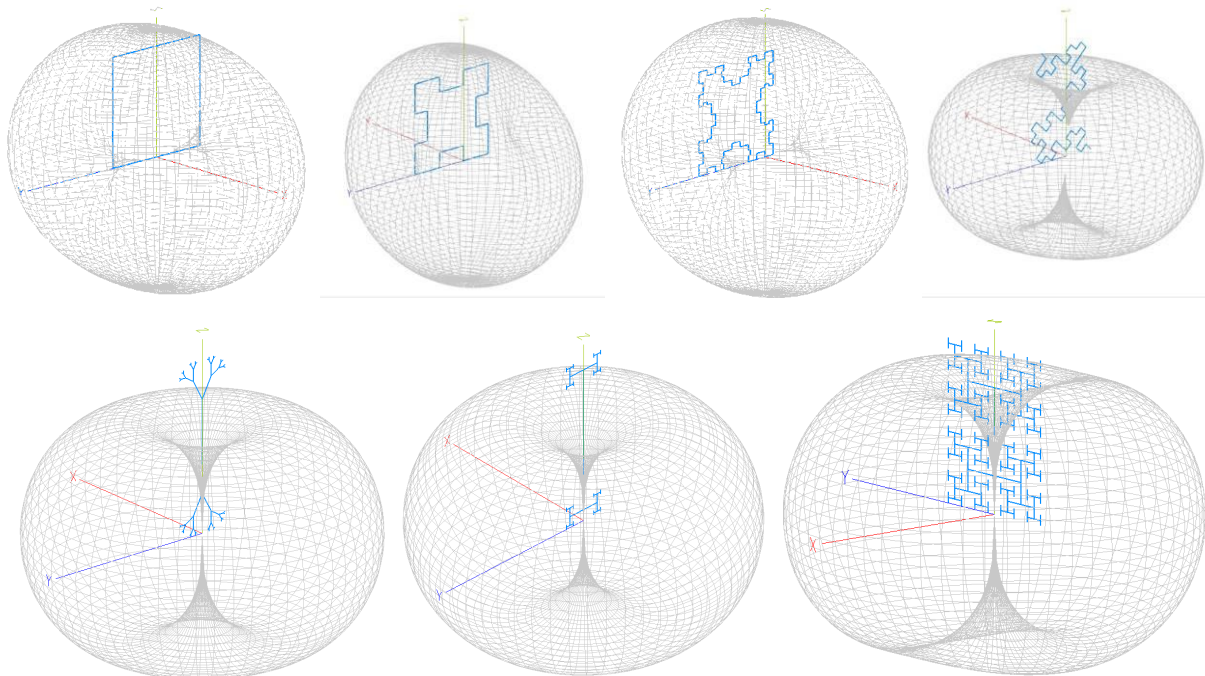


Рис. 4. Результуючі 3D ДС антен, що отримані в MMANA-GAL

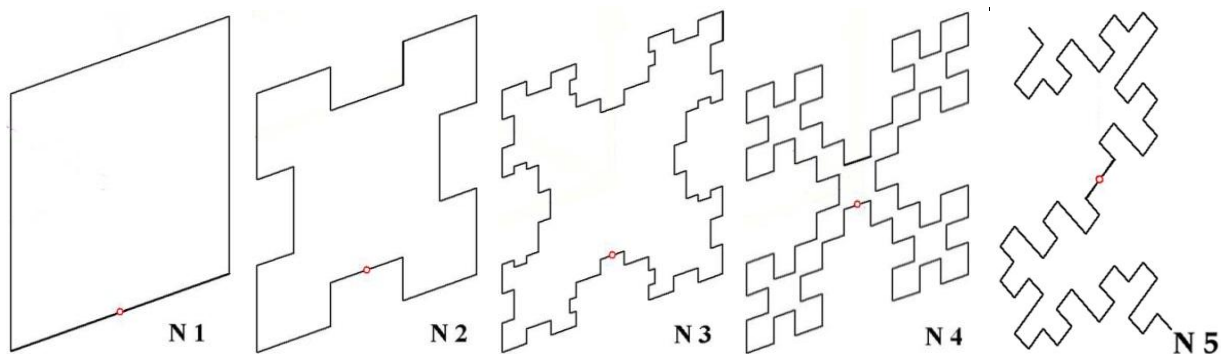


Рис. 5. Моделі антен, що отримані в програмі MMANA-GAL

Аналогічним чином, отримано значення параметрів для інших антен до та

після процедури масштабування (табл. 2).

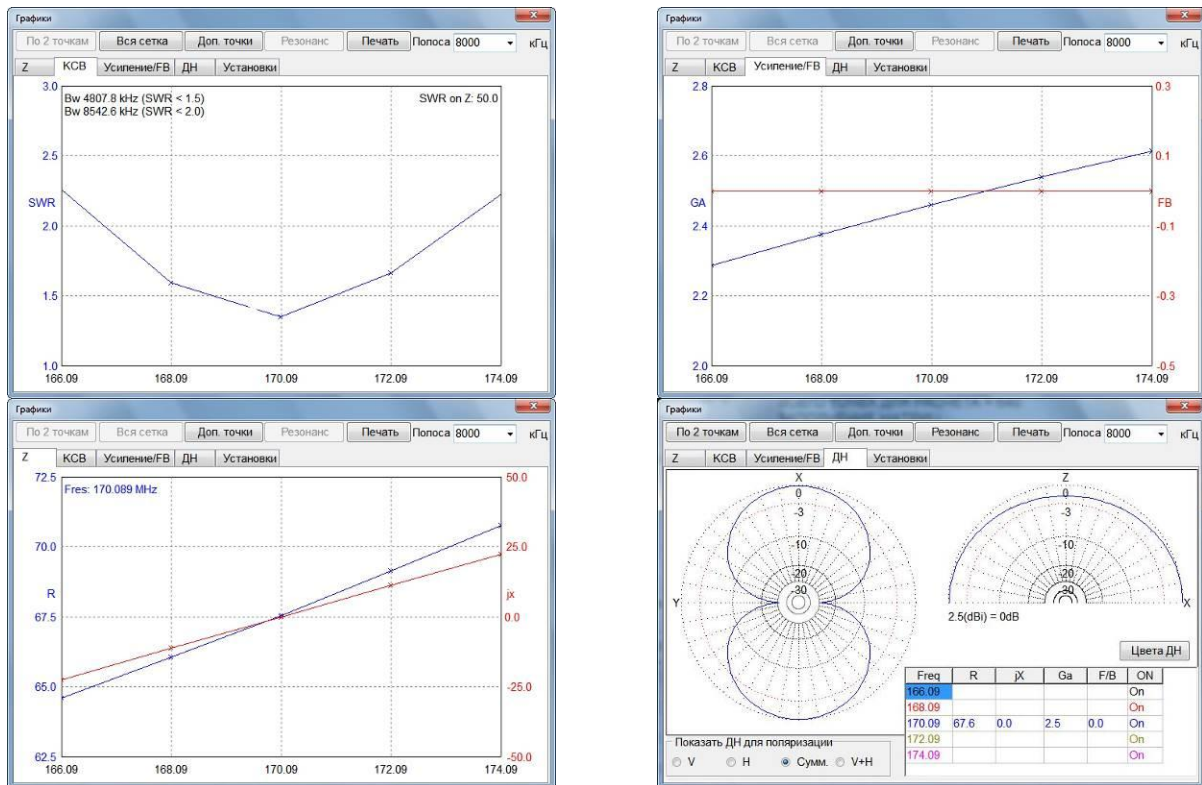


Рис. 6. Параметри базової антени № 3

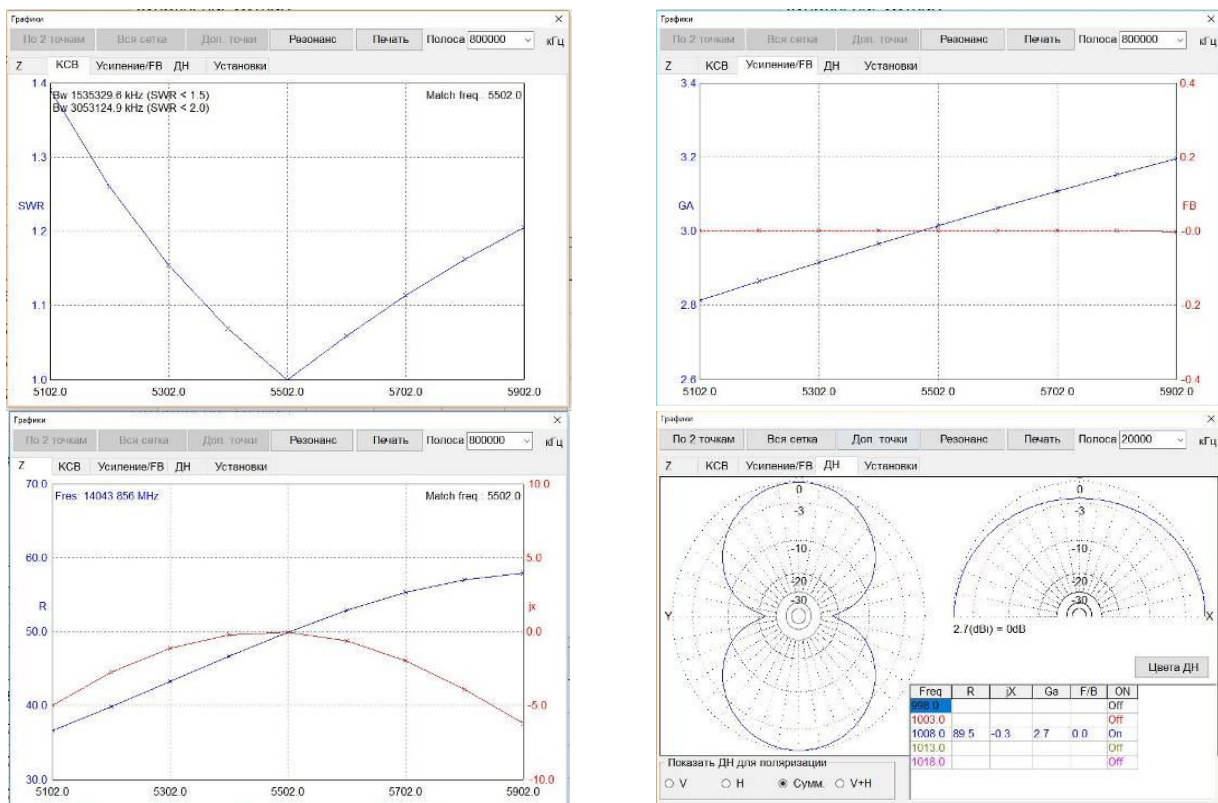


Рис. 7. Параметри масштабованої антени № 3

Слід враховувати те, що антена № 4 (з бібліотеки MMANA-GAL) має  $Re(Z_B) = 27 \text{ Ом}$  замість  $50 \text{ Ом}$  [7]. Як наслідок, після оптимізації та

масштабування 3D ДС не відповідає введеним при моделюванні умовам (рис. 10).

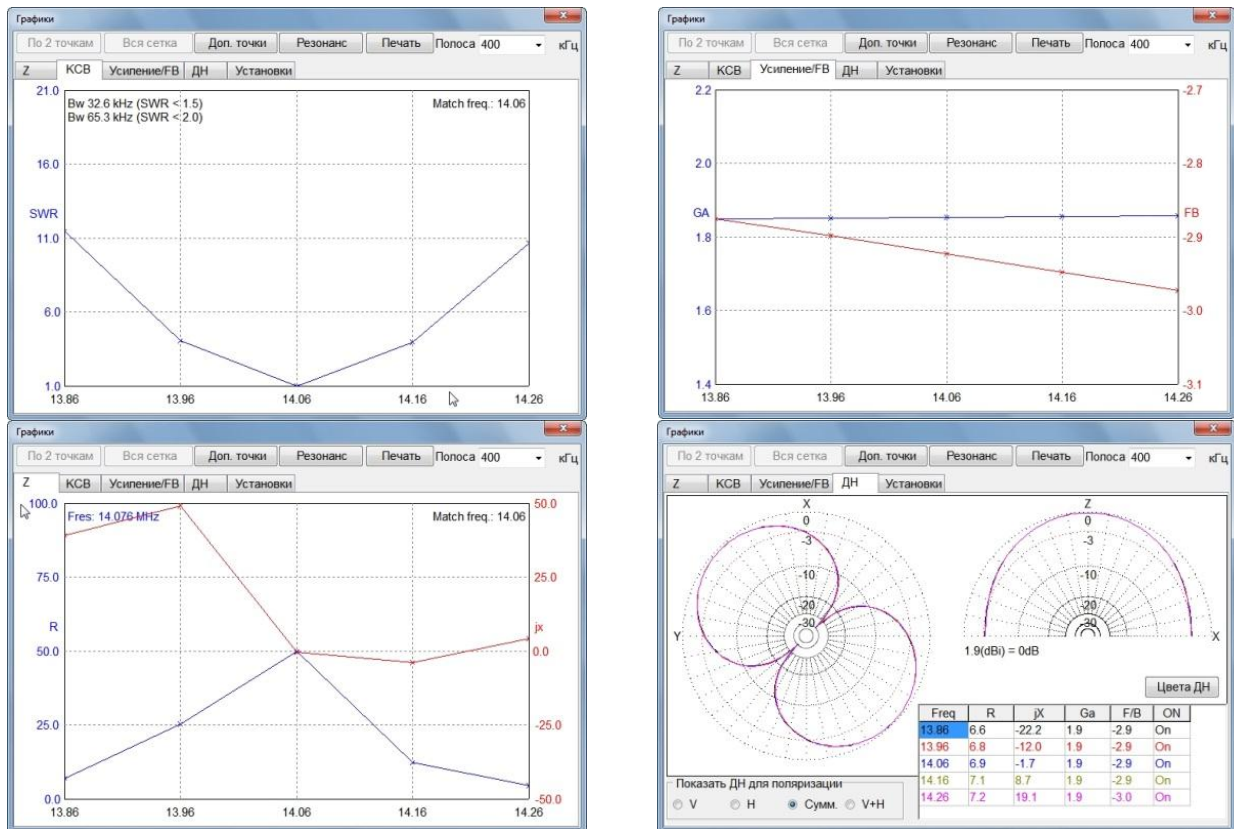


Рис. 8. Параметри базової антени № 5

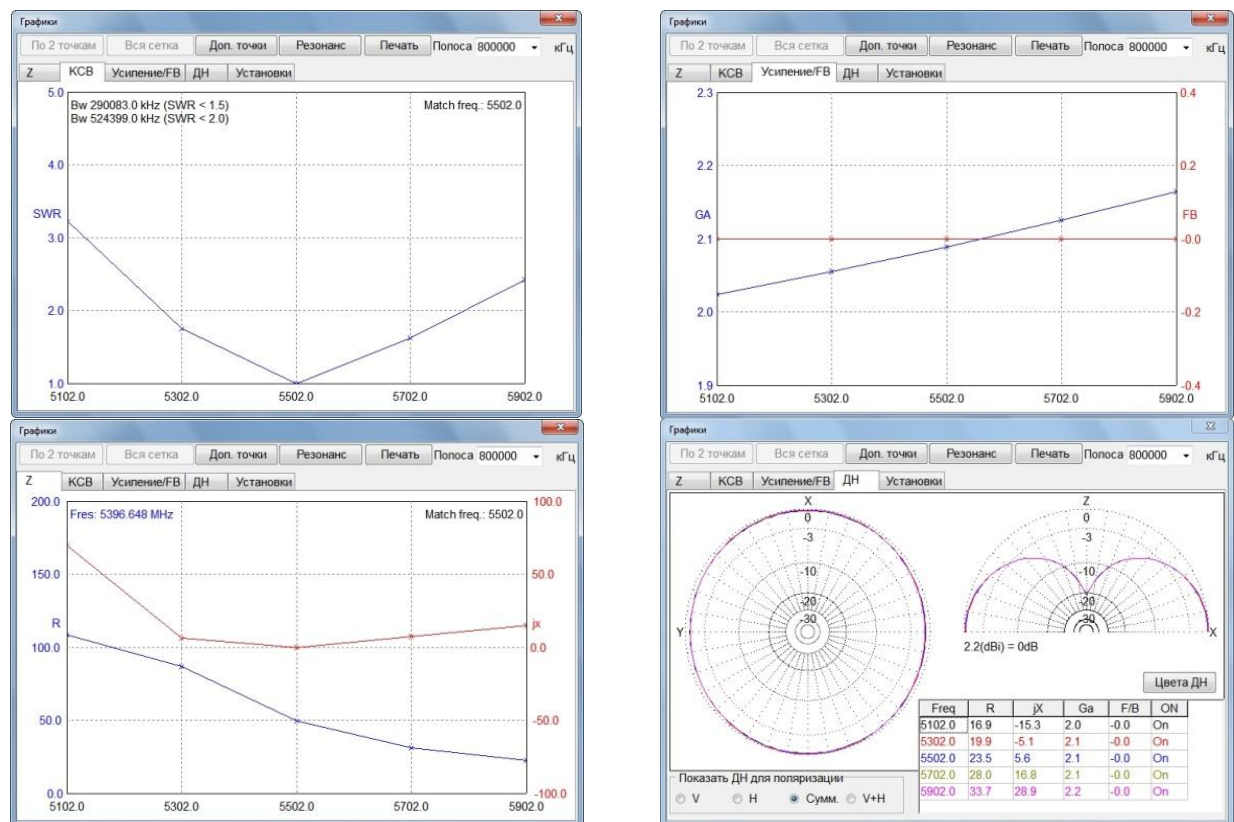


Рис. 9. Параметри масштабованої антени № 5

Таким чином, наведені результати свідчать про досягнення певного рівня мініатюризації антенних систем. Якщо обмежитись габаритами антен існуючих маршрутизаторів Wi-Fi (рис. 11), то можливо реалізувати набір лінійних антенних решіток на основі друківаних антен з метою підвищення ефективності технології MU-MIMO в рамках 802.11ax.

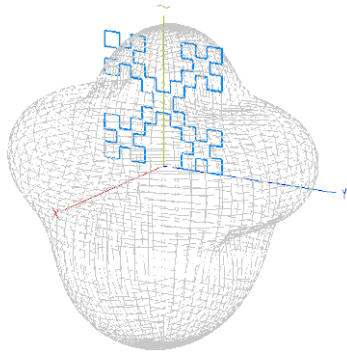


Рис. 10. ДС антени № 4



Рис. 11. Колінеарна антена роутера Wi-Fi

Таблиця 1

Параметри базових антен

№ антени	$f_{res}$ , МГц	Bw (SWR<2,0), кГц	Ga, дБі	F/B, дБ	SWR	Розміри, см
1	125,789	6672,3	3,32	0	2,56	64x64
2	139,867	8290,7	2,7	0	1,61	48x48
3	170,09	8542,6	2,46	0	1,35	36x36
4	14,21	131,3	2,02	0	2,11	284x284
5	14,19	33,5	1,86	2,9	1,01	282x304

Таблиця 2

Параметри базових і масштабованих антен

№ антени		Bw (SWR<2,0), кГц	Ga, дБі	F/B, дБ	SWR	Розміри, см
1	Базова	6672,3	3,32	0	2,56	64 x 64
	Масштабована	5211497	3,63	0	2,94	1,4 x 1,4
2	Базова	8290,7	2,7	0	1,61	48 x 48
	Масштабована	3034739,8	3,19	0	2,49	1,1 x 1,1
3	Базова	8542,6	2,46	0	1,35	36 x 36
	Масштабована	3196563,7	3,03	0	2,51	0,8 x 0,8
4	Базова	131,3	2,02	0	2,11	284 x 284
	Масштабована	412346,2	2,23	-5,67	1,29	0,7 x 0,7
5	Базова	33,5	1,86	2,9	1,01	282 x 304
	Масштабована	524399	2,09	0	2,16	0,8 x 1,2



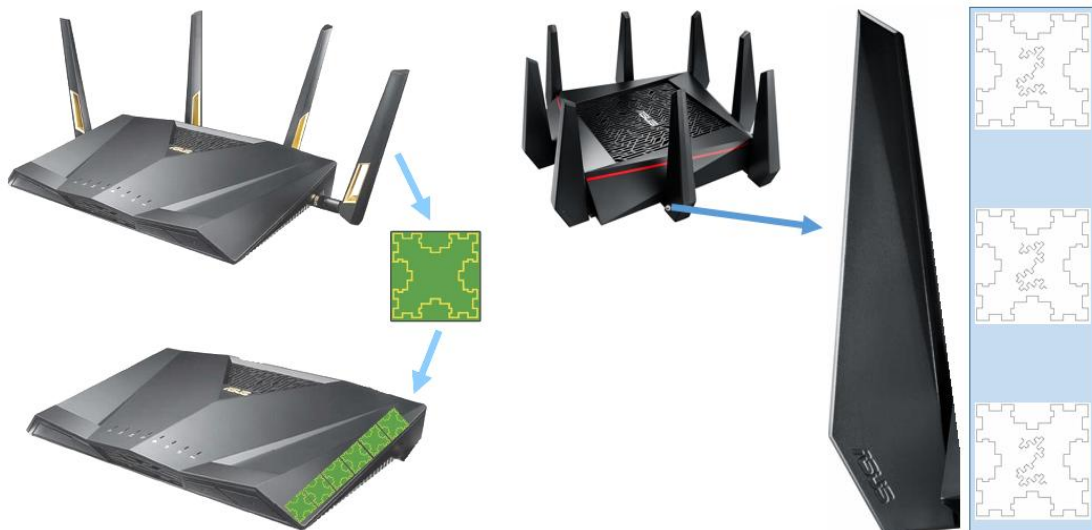


Рис. 12. Варіант заміни антенного елемента для розширення можливостей роутерів з MU-MIMO на прикладі конструктивів Asus RT-AX88U і RT-AC5300

## ВИСНОВКИ

Для виконання фрактальних перетворень достатньо обмежуватись на рівні перших 5-ти або 6-ти ітерацій. При використанні MMANA-GAL, для узгодження з потрібним частотним діапазоном необхідно експериментально підбирати частоту масштабування. Зазначену програму доцільно використовувати для антен, що складаються з прямолінійних сегментів, загальна кількість яких не перевищує 4096. Практична реалізація синтезованих антен передбачає застосування пристроїв узгодження.

Подальші дослідження спрямовані на визначення властивостей фрактальних 3D-структур.

## Посилання

1. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 5. – С. 78-83.
2. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Часть 2. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 6. – С. 82-89.
3. Mandelbrot, B.B. *Fractals: Forme, Chance and Dimension* / B.B. Mandelbrot. – San-Francisco: Freeman, 1977. – 365 p.

4. Гончаренко И. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. / И. Гончаренко. – М.: РадиоСофт. – 2002. – 80 с.

5. Слюсарь І.І. Синтез фрактальних антен діапазону 5 ГГц в пакеті MMANA. / І.І. Слюсарь, Слюсар В.І. Павлюк С.Ф., Кохан Л.І. // Тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації», 26-27 жовтня 2017 р. – ЧДТУ, ВА ЗС АР, УТіГН, ПНТУ, 2016 р. – С. 80.

6. Слюсарь І.І. Технічні аспекти реалізації перспективних технологій MIMO. / І.І. Слюсарь, Слюсар В.І., Дерій Р.С., Довбиш Р.М. // Тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації», 26-27 жовтня 2017 р. – ЧДТУ, ВА ЗС АР, УТіГН, ПНТУ, 2016 р. – С. 81.

7. Наконечний В.С. Разновидности фрактальных антенн и примеры их применения / Наконечний В.С. // Зв'язок – 2015 № 3 – С.53-55.

**Authors:**

Sliusar I.I., Sliusar V.I., Pavliuk S.F., Kohan L.I., Derii R.S.

**SYNTHESIS OF FRACTAL ANTENES IN THE PACKAGE MMANNA**

**Abstract.** The results of simulation of antennas on fractal basis are presented in the work. Due to the complexity of describing the interaction of non-Euclidean geometry antennas with radio waves, their synthesis was performed using the MMANA-GAL program. The proposed sequence of simulation steps allows for multi-bandwidth and broadband. On the basis of the conducted researches recommendations on practical application of fractal structures in the interests of systems and networks 802.11x and 5G are offered.

**Keywords:** antenna, directional diagram, fractal, MMANA, SWR.

**Автори:**

Слюсарь І.І., Слюсар В. І., Павлюк С.Ф., Кохан Л.І., Дерій Р.С.

**СИНТЕЗ ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕН В ПАКЕТЕ MMANA**

**Аннотация.** В работе представлены результаты моделирования антенн на фрактальной основе. Из-за сложности описания взаимодействия антенн неевклидовой геометрии с радиоволнами их синтез выполнен с использованием программы MMANA-GAL. Предложенная последовательность этапов моделирования позволяет обеспечить многодиапазонность и широкополосность. На основе проведенных исследований предложены рекомендации по практическому применению фрактальных структур в интересах систем и сетей 802.11x и 5G.

**Ключевые слова:** антенна, диаграмма направленности, коэффициент стоящей волны, фрактал, MMANA.