

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Нудьга Олександр Олександрович

УДК 621.396.67

**БАГАТОДІАПАЗОННІ АНТЕНИ
НА ОСНОВІ ФРАКТАЛЬНИХ СТРУКТУР**

05.12.07 — Антени та пристрої мікрохвильової техніки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків — 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Севастопольському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Савочкін Олександр Анатолійович
Севастопольський національний технічний
університет Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
лауреат Державної премії України
Колчигін Микола Миколайович
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти
і науки України,
завідувач кафедри теоретичної радіофізики

кандидат технічних наук, доцент
лауреат Державної премії України
Грецьких Дмитро В'ячеславович
Харківський національний університет
радіоелектроніки Міністерства освіти
і науки України,
доцент кафедри основ радіотехніки

Захист відбудеться «24» квітня 2014 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розіслано «22» березня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Наразі спостерігається бурхливий розвиток сфери телекомунікаційних послуг. Антенні пристрої є невід'ємною частиною будь-якої системи яка використовує радіохвилі. З розвитком бездротових систем передачі інформації і появою мобільних технологій третього, четвертого поколінь виникла необхідність створення антен для базових станцій і мобільних терміналів, які використовують різні смуги частот одночасно. Сучасні дослідники намагаються використовувати відомі в геометрії фрактали в антенних рішеннях. Теорія фрактальних антен знаходиться на етапі формування, відсутність строгих формул і залежностей призводить до необхідності моделювання та експериментів, тому існує необхідність у подальших дослідженнях і розробках антен, побудованих на основі фракталів.

Аналіз доступних літературних джерел показав, що розвиток телекомунікаційних технологій вимагає нових антенних рішень. У зв'язку з цим дослідження в області фрактальних антен є актуальними і перспективними для практичного застосування. Дослідження в даному напрямку проводяться численними дослідниками, як в Україні, так і за кордоном.

Тому є актуальною тема дисертаційних досліджень, направлених на створення багатодіапазонних антен виконаних на основі фрактальних структур.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційні дослідження зв'язані з виконанням планових держбюджетних науково-дослідницьких робіт «Оптимізація антенних решіток гібридних дзеркальних антен для радіотелескопів», шифр «Астра», (ДР 0110U003417), «Розробка та дослідження слабоспрямованих багатодіапазонних антен», шифр «Сузір'я» (ДР 0111U007995), в яких здобувач був виконавцем, і які виконувалися на кафедрі радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету.

Мета і задачі дослідження

Розробка і дослідження слабоспрямованих багатодіапазонних антен на основі фрактальних структур з лінійною і круговою поляризацією шляхом використання методу точного електродинамічного аналізу, експериментальна перевірка характеристик випромінювання та узгодження запропонованих модифікацій квазіфрактальних антен.

Для досягнення поставлених цілей в роботі вирішуються наступні задачі:

- на основі методу інтегральних рівнянь розробляється математична модель багатодіапазонних фрактальних і квазіфрактальних антен;
- за допомогою комп'ютерної моделі в САПР *FEKO* досліджується робота фрактальних антен на основі структури Серпінського, а також на основі квазіфрактальних структур;
- розробляється нова багатодіапазонна антена кругової поляризації на основі фрактальної структури Серпінського;
- виконується експериментальна перевірка адекватності математичної та комп'ютерної моделей антен;

— досліджуються електродинамічні властивості багатодіапазонних антен.

Об'єкт дослідження: хвильові процеси формування електромагнітного поля багатодіапазонними антенами на основі фрактальних і квазіфрактальних структур.

Предмет дослідження: вхідні характеристики і характеристики випромінювання багатодіапазонних антен лінійної і кругової поляризації на основі фрактальних і квазіфрактальних структур.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених у дисертації завдань проведено дослідження, засновані на використанні методів: «систем ітеріруємих функцій» — для опису геометрії фрактальної структури; інтегральних рівнянь — для визначення розподілу струмів на елементах антени; метод моментів при використанні методу колокацій — для чисельного рішення інтегральних рівнянь; розрахунку характеристик випромінювання та комп'ютерного моделювання — для дослідження характеристик антен, виконаних на основі фрактальних структур; експериментальних досліджень виготовлених макетів антен.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблена та обґрунтована математична модель, що дозволяє шляхом чисельного моделювання методом інтегральних рівнянь визначити електродинамічні характеристики планарних багатодіапазонних антен, виконаних на основі фрактальних структур. Відмінні особливості отриманого результату від існуючих в тому, що запропонована геометрія планарних багатодіапазонних антен ще не була розрахована даним методом.

2. Розроблена нова сіткова модель планарної багатодіапазонної антени фрактального типу, відмінні особливості отриманого результату від існуючих в тому, що вона виконана на основі уявлення антени у вигляді сукупності дротяних випромінювачів.

3. Вперше запропоновано методику визначення геометрії багатодіапазонної планарної антени з нахиленим випромінювачем, відмінними особливостями отриманого результату від існуючих є те, що методика заснована на уявленні антени у вигляді неоднорідної несиметричною смужкової лінії. Адекватність запропонованої методики підтверджена результатами комп'ютерного моделювання та експериментальними дослідженнями.

4. Запропоновані нові типи планарних багатодіапазонних антен кругової поляризації на основі використання фрактальної структури Серпінського та її модифікацій, на відміну від існуючих однодіапазонних антен. Доведено на підставі результатів комп'ютерного моделювання та експериментально можливість їх практичного використання.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновано та досліджено нові варіанти планарних багатодіапазонних антен на основі фрактальної структури Серпінського та її модифікацій, що забезпечують формування слабоспрямованого випромінювання та спрощення процесу їх виробництва.

2. Розроблено алгоритм і програму визначення геометрії фрактальних структур з використанням методу систем ітеріруємих функцій.

3. Запропонована та досліджена багатодіапазонна антена з довільною кратністю центральних частот для робочих діапазонів. Запропоновано модифікацію багатодіапазонної антени з прямокутними отворами. Визначено коефіцієнт для інженерної формули розрахунку частот резонансу багатодіапазонної антени з прямокутними отворами.

4. Запропоновано новий варіант плоскої слабоспрямованої антени з нахиленим випромінювачем і виконано його дослідження.

5. Запропоновано новий варіант багатодіапазонної антени кругової поляризації на основі використання фрактальної структури Серпінського. Досліджено варіант багатодіапазонної антени кругової поляризації з нелінійним профілем, що забезпечує поліпшення узгодження антени і формування осісиметричної діаграми спрямованості.

6. Результати роботи впроваджені на підприємствах: ТОВ «УРАНІС», акт впровадження від 29 листопада 2013 р.; компанії *LEDS Inc.* (Торонто, Канада), акт впровадження від 15 грудня 2013 р.; ТОВ «Міст-інформ», акт впровадження від 6 грудня 2013 р.; ТОВ «Інженерно-технологічні рішення», акт впровадження від 16 грудня 2013 р.

Обґрунтованість та достовірність результатів

Достовірність теоретичних досліджень обумовлена коректним використанням відомих методів розрахунку, та добрим збігом результатів досліджень в розробленій програмі, на основі інтегральних рівнянь, та моделювання в готових САПР з експериментальними даними. Достовірність експериментальних досліджень обумовлена застосуванням високоточних вимірювальних приладів.

Особистий внесок здобувача

Автор самостійно отримав основні результати дисертаційної роботи. У роботах, виконаних в співавторстві, авторові належать наступні результати: [1] — результати моделювання та проведення експериментальних досліджень антен; [2, 11, 28] — результати моделювання та уточнення коефіцієнта інженерної формули квазіфрактальної антени та аналіз отриманих результатів; [3, 16, 19, 20] — розробка математичної моделі антени на основі інтегральних рівнянь, аналіз отриманих результатів; [6, 8, 15, 26] — розробка моделі антени у САПР *FEKO*; [7] — розробка алгоритму програми для розрахунку геометрії модифікованої антени; [10] — розрахунок оціночної моделі визначення діаграми спрямованості модифікованої антени в пакеті *Mathcad*; [22, 25] — розробка математичної моделі антени в пакеті *MATLAB* на основі інтегральних рівнянь. Роботи [4, 5, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 21, 23, 24, 26, 28] — виконані одноосібно.

Апробація результатів дисертації

Основні результати проведених досліджень даної дисертації були представлені на наступних міжнародних конференціях: 7-й, 8-й, 9-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (м. Севастополь — 2011, 2012, 2013 р.); 5-й, 6-й, 7-й Міжнародній науково-технічній конференції та 3-й, 4-й, 5-й студентській науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ — 2011, 2012, 2013 р.); 8-й, 9-й Міжнародній

конференції «Теорія і техніка антен» (м. Київ — 2011 р., м. Одеса — 2013 р.); 15-му, 16-му, 17-му Міжнародному молодіжному форуму «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (м. Харків — 2011, 2012, 2013 р.); 11-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (м. Львів — 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіти)» (м. Київ — 2012, 2013 р.); 22-й, 23-й Міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (м. Севастополь — 2012, 2013 р.); 6-й Міжнародній конференції «Надширокосмугові і ультракороткі імпульсні сигнали» (м. Севастополь — 2012 р.); матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті 2011», (Одеса: 2011 р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 30 друкованих робіт, з них: 6 робіт — статті в спеціалізованих фахових виданнях; 2 роботи — у збірниках наукових праць за кордоном; 22 — статей та тез доповідей у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій. Також автором подана 1 заява на патент України.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, що містить 106 робіт вітчизняних і зарубіжних авторів та трьох додатків. У додатках включені акти впровадження результатів роботи, графіки розподілу частотного ресурсу між різними стандартами зв'язку, текст програми на основі інтегральних рівнянь у пакеті *MATLAB*. Основний зміст дисертації викладений на 184 сторінках, містить 142 малюнка та 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Визначено наукову новизну роботи та її практичне значення. Наведено дані про особистий внесок автора у роботах, виконаних в спів-авторстві, апробацію результатів дисертації та відомості про публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** проведено огляд сучасних багатодіапазонних антен та поставлено задачі дисертаційної роботи. Розглянуто принципи побудови та основні типи широкосмугових і багатодіапазонних антен. Організація геометрії багатодіапазонних антен зводиться до створення самоподібних структур до ідей використання яких прийшли від принципу масштабування частоти в експериментальних дослідженнях.

Також у першому розділі вводиться поняття фрактальної геометрії. Відмінність фрактальних геометричних форм — їх дробова розмірність, що зовні проявляється в рекурсивному повторенні в зростаючому або зменшуваному масштабах вихідних детермінованих або випадкових шаблонів.

Фрактальна геометрія знайшла своє застосування в антенній техніці. Фрактальні антени — відносно новий клас електрично малих антен, що принципово відрізняється своєю геометрією від відомих рішень. Наведені приклади антен оснований на фрактальній геометрії.

Прикладом багатодіапазонного варіанту є антена виконана на основі структури Серпінського (рис. 1). У дисертації розглянуті деякі варіанти модифікацій антен на основі структури Серпінського.

Написана програма для опису геометрії модифікованої антени на основі структури Серпінського за допомогою системи ітеріруємих функцій, а також запропоновані інженерні методи розрахунку геометрії та діаграм спрямованості квазіфрактальних антен.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений теоретичному дослідженню багатодіапазонних антен виконаних на основі фрактальних структур. Запропоновано метод рішення внутрішньої задачі, знаходження струмів текучих по поверхні антени, на основі інтегральних рівнянь.

На першому етапі розглянемо варіант багатодіапазонної антени з використанням структури Серпінського. Геометрія планарної антени, показана на рис. 2. Антена складається з двох тонких провідних елементів: екрану та випромінюючої структури. Живлення структури забезпечується підключенням зовнішнього джерела збудження до однієї з вершин випромінюючої структури в точці C , як показано на рис. 2, тобто випромінююча структура збуджується стороннім полем тільки в одній точці.

У розглянутому випадку випромінювач і екран ідеально провідні. У цьому випадку на поверхні елементів дотична складова електричного поля повинна бути рівною нулю. На поверхні елементів антени існує не тільки поле, створене струмом, що протікає в елементах, а й стороннє поле, що збуджує струм в елементах антени. Тому граничній умові має задовольняти повне поле, рівне сумі поля струму в елементах антени та стороннього поля:

$$E_{\tau} + E_{\text{тст}} = 0, \quad (1)$$

де E_{τ} — дотична до поверхні елемента складова вектора електричного поля, створеного струмами елементів антени; $E_{\text{тст}}$ — дотична до поверхні елемента складова стороннього поля.

З метою аналізу загальної структури антени, розділимо випромінювач і екран антени на підобласті, наступним кроком заміняємо підобласті на дротяні випромінювачі як показано на рис. 3. Струм, що протікає по дротяному випромінювачю, вважаємо постійним і рівним за величиною Ig , де g — номер випромінювача (елементарної площадки), і лінійно поляризованим уздовж осі Z . Номер випромінювача g для всіх елементів антени та всіх випромінювачей буде приймати значення в діапазоні від 1 до g_{max} .

Використовуючи рівняння Максвелла для комплексних амплітуд поля і граничні умови отримаємо інтегральне рівняння Поклінгтона для розподілу струму у ви-

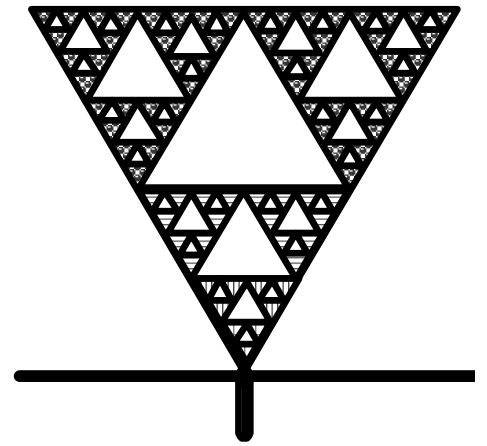


Рис. 1. Фрактальна антена

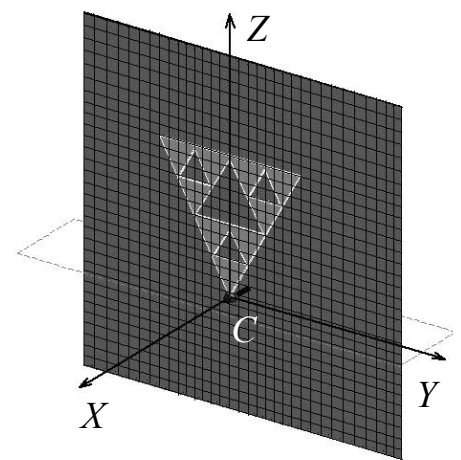


Рис. 2. Геометрія фрактальної антени

гляді

$$-i \frac{\omega \mu_a}{4\pi} \int_{z_S} \left[G(P, Q) \cdot I(Q) (\vec{z}_0, \vec{S}_0) + \frac{1}{k^2} \frac{dG(P, Q)}{dz_p} \frac{dI(Q)}{dz_q} \right] dz_q = -(\vec{E}_{\text{ст}}, \vec{S}_0), \quad (2)$$

де ω — кругова частота збуджуючого стороннього поля; μ_a — абсолютна магнітна проникність середовища; z_S — інтервал інтегрування; G — функція Гріна вільного простору; P — точка визначення поля (точка спостереження); Q — точка витoku (точка інтегрування); $I(Q)$ — ток на елементі Q ; $\vec{S}_0$ — одиничний вектор дотичний до поверхні елемента антени в точці Q ; $k = 2\pi/\lambda$ — хвильове число вільного простору; $E_{\text{ст}}$ — напруженість стороннього поля в точці збудження антени.

У процесі інтегрування (2) при збігу точок P і Q підінтегральний вираз розходиться, так як функція Гріна прагне до нескінченності. Для усунення цієї особливості, виконаємо зміщення точки спостереження P на відстань a_0 , яке значно менше повного розміру структури і довжини хвилі λ (рис. 3). Для моделі на рис. 3 введені позначення: z_q, y_q, z_p, y_p — лінійні координати точок Q і P , в системі координат Y, Z . У цьому випадку можна вважати, що струми для всіх підобластей орієнтовані вздовж осі Z , і їх щільності однакові у всіх точках поперечного перерізу в межах кожної підобласті.

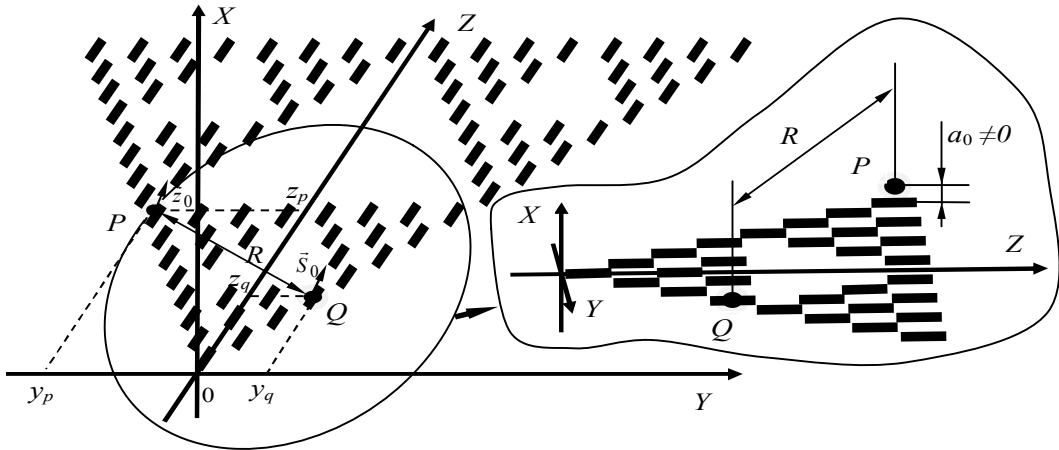


Рис. 3. Модель випромінюючого елемента антени

Інтегрування виконується за всіма елементами антени (рис. 3). Символи P і Q у виразі (2), що позначають точки витoku і спостереження, замінимо лінійними координатами x_q, y_q, z_q і x_p, y_p, z_p цих точок. У результаті вираз (2) приймає вигляд:

$$\int_{z_S} \left[G(x_q, y_q, z_q, x_p, y_p, z_p) \cdot I(z_q) (\vec{z}_0, \vec{S}_0) + \frac{1}{k^2} \frac{dG(x_q, y_q, z_q, x_p, y_p, z_p)}{dz_p} \frac{dI(z_q)}{dz_q} \right] dz_q = -i \frac{4\pi}{\omega \mu_a} (\vec{E}_{\text{ст}}, \vec{S}_0). \quad (3)$$

У рівняння (3) входять шуканий струм і його перша похідна по координаті z_q . Наявність похідної струму обмежує можливості чисельного рішення рівняння. Це пов'язано з тим, що рішення інтегрального рівняння шукається у вигляді розкладання його в ряд по базисних функціях. Очевидно, базисні функції повинні бути диференційовними на тому інтервалі зміни координати z_q , в межах якого визначається струм в елементі антени.

З метою спрощення (3) інтегруємо другий доданок по частинах, а результат рішення (3) шукається у вигляді розкладання по системі відомих ортогональних функцій $f_m(z_q)$:

$$I(z_q) = \sum_{m=1}^M I_m f_m(z_q), \quad (4)$$

де m — номер члена ряду; M — число членів ряду.

Чисельне рішення інтегрального рівняння (3) виконаємо методом моментів при використанні методу колокацій, оскільки цей метод дозволяє ефективно вирішувати інтегральні рівняння з достатньою для інженерних застосувань точністю. Підставляючи (4) в (3) і виконуючи перетворення з урахуванням ортогональності базисних функцій, отримуємо:

$$\sum_{m=1}^M I_m K_m(z_q) = U(z_p), \quad K_m(z_q) = \int_{z_S} Z(x_q, y_q, z_q, x_p, y_p, z_p) f_m(z_q) (\bar{z}_0, \bar{S}_0) dz_q, \quad (5)$$

де $Z(x_q, y_q, z_q, x_p, y_p, z_p)$ — ядро інтегрального рівняння; $U(z_p)$ — права частина інтегрального рівняння (3).

Для отримання необхідної кількості рівнянь (5) використовуємо систему вагових функцій $g_n(z_p)$, ортогональних на інтервалі z_S . У разі використання ортонормованих базисних і вагових функцій система з M лінійних алгебраїчних рівнянь виходить з (5) в результаті виконання метода моментів. В результаті отримуємо систему рівнянь за умови $n = 1, 2, 3, \dots M$; $m = 1, 2, 3, \dots M$:

$$\sum_{m=1}^M I_m K_{mn} = U_n, \quad (6)$$

$$K_{mn} = \int_{z_S} \int_{z_S} Z(x_q, y_q, z_q, x_p, y_p, z_p) f_m(z_q) g_n(z_p) (\bar{z}_0, \bar{S}_0) dz_q dz_p; \quad U_n = \int_{z_S} U(z_p) g_n(z_p) \cdot dz_p.$$

Далі систему лінійних алгебраїчних рівнянь (6) вирішуємо чисельно методами лінійної алгебри. В якості базисних функцій підобластей зазвичай використовують: кусочно-постійні, кусочно-лінійні та кусочно-синусоїдальні функції. У процесі роботи були досліджені всі три варіанти базисних функцій підобластей. Для детального дослідження фрактальної антени були обрані кусочно-постійні базисні функції. В якості вагових функцій використовуємо δ -функції $g_n(z_m)$. Таким чином, вирішуючи систему (6) щодо невідомих коефіцієнт розкладання I_m , знаходимо розподіл струмів по поверхні антени.

Розроблено методику визначення розподілу струмів фрактальних і квазіфрактальних антен яка заснована на чисельному рішенні інтегрального рівняння методом моментів.

Для вирішення зовнішньої задачі для антен, виконаних на основі фрактальних структур, використовуємо формулу для напруженості електричного поля елементарного випромінювача:

$$Ez_g(r_g, \vartheta_g, \varphi_g) = I_g \cdot \frac{k^2 \rho \Delta z}{4\pi} \left\{ \begin{aligned} &2 \left[\frac{1}{(kr_g)^2} - \frac{1}{i(kr_g)^3} \right] \cos \vartheta_g^2 - \\ & - \left[\frac{1}{ikr_g} + \frac{1}{(kr_g)^2} - \frac{1}{i(kr_g)^3} \right] \sin \vartheta_g^2 \end{aligned} \right\} \cdot e^{-ikr_g} = I_g \cdot K_g, \quad (7)$$

де $r_g, \vartheta_g, \varphi_g$ — координати точки спостереження у системі координат пов'язаної з центром підобласті g , $\tilde{k}$ — коефіцієнт поширення хвилі в середовищі, I_g — струм постійний в межах підобласті довжиною Δz , ρ — хвильовий опір середовища, K_g — відомі коефіцієнти розкладання.

Далі використовуючи співвідношення (7), яке дозволяє визначити напруженість електричного поля $Ez_g(r_g, \vartheta_g, \varphi_g)$ в декартовій системі координат, визначимо сумарну напруженість електричного поля в точці спостереження M : $E_\Sigma = \sum_{g=1}^{g_{\max}} Ez_g$.

Розрахунок складових поля випромінювання за розробленою методикою дозволяє визначити характеристики випромінювання на довільній відстані від багатодіапазонної антени без використання спеціалізованих програм автоматизованого проектування високочастотних структур.

На прикладі плоскої дипольної антени виконаний розрахунок методом інтегральних рівнянь розподілу токів та поля випромінювання. Показано, що розподіл струмів має симетричний характер, а антена формує однопелюсткову діаграму спрямованості у діапазоні частот від 30 МГц до 1,5 ГГц.

Крім того у другому розділі запропонована модифікована логоперіодична структура рис. 4, і виконано її моделювання. Емпіричним шляхом виведено новий коефіцієнт інженерної формули визначення резонансних частот модифікованої логоперіодичної структури:

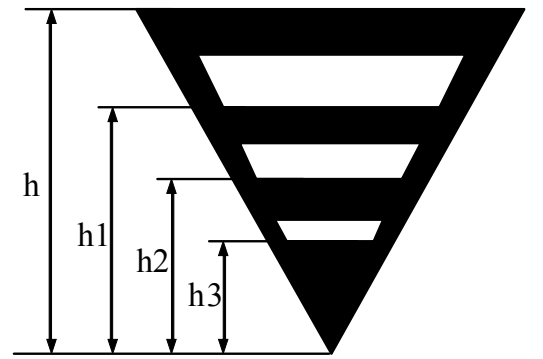


Рис. 4. Багатодіапазонна антена на основі періодичної структури

$$f_n = 0,358 \frac{c}{h} \delta^n, \quad (8)$$

c — швидкість світла у вакуумі, h — повна висота структури, δ — коефіцієнт масштабу, n — ціле число, номер резонансної частоти.

Шляхом моделювання в САПР *FEKO* підтверджена можливість створення антен здатних працювати у декількох діапазонах частот із зменшеною кратністю центральних частот робочих діапазонів, на основі використання квазіфрактальних логоперіодичних структур.

Встановлено можливість практичного використання багатодіапазонних антен простої конструкції на основі фрактальної структури, в якій виключаються отвори в кінцевій частині.

Третій розділ присвячений планарним багатодіапазонним антенам. Розглянуті

планарні антени на основі структури Серпінського у яких випромінювач розташований паралельно екрану.

Визначено відстань між екраном і випромінюючим елементом у припущенні уявлення планарної антени у вигляді неоднорідної несиметричної полоскової лінії (НПЛ) (рис. 5 а, б). Для середньої ширини w випромінюючого елемента забезпечено рівність хвильового опору коаксимальній лінії живлення ($Z_b = 50$ Ом). За методикою визначено відстань h_n між випромінюючим елементом і екраном (рис. 5 б), яке відповідає необхідному хвильовому опору.

Розглянуто планарну антену на основі модифікованої фрактальної структури з короткозамикачем (рис. 5 в). Довжина випромінювача обрана 0,175 м. Відстань між екраном і точкою підключення на випромінювачі 0,018 м.

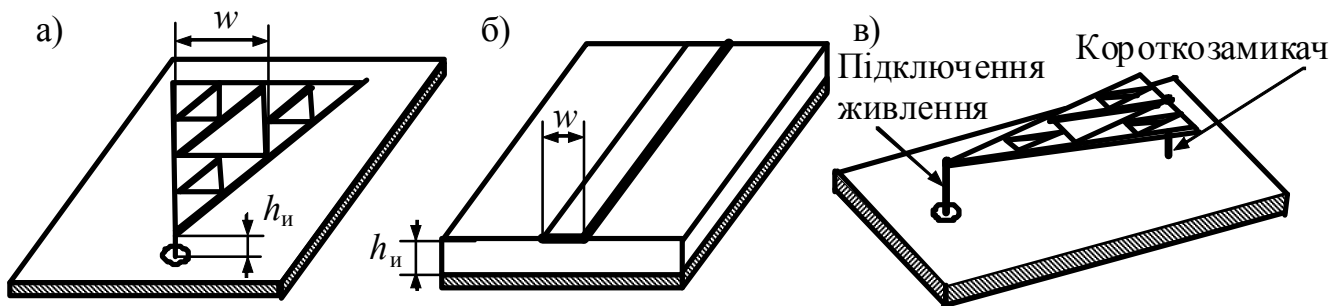


Рис. 5. Схеми планарної багатодіапазонної антени (а), мікрополоскової лінії (б) планарної багатодіапазонної антенни з короткозамикачем (в)

Результати розрахунку діаграми спрямованості (ДС) планарної антени з короткозамикачем для роботи в діапазонах частот 900 і 1800 МГц в E і H -площині, розраховані в пакеті електродинамічного аналізу *FEKO*, наведено на рис. 6. При цьому забезпечується найкращий рівень узгодження 2,1 ... 2,3, і спостерігаються спотворення головного пелюстка ДС на частоті 1,8 ГГц. Рівень крос поляризації антени з короткозамикачем на частоті 0,9 ГГц становив -40 дБ, на частоті 1,8 ГГц — -22 дБ.

На основі розрахованих даних, шляхом моделювання визначено новий коефіцієнт у формулі для планарних антен

$$f_n = 0,452 \frac{c}{h} \delta^n.$$

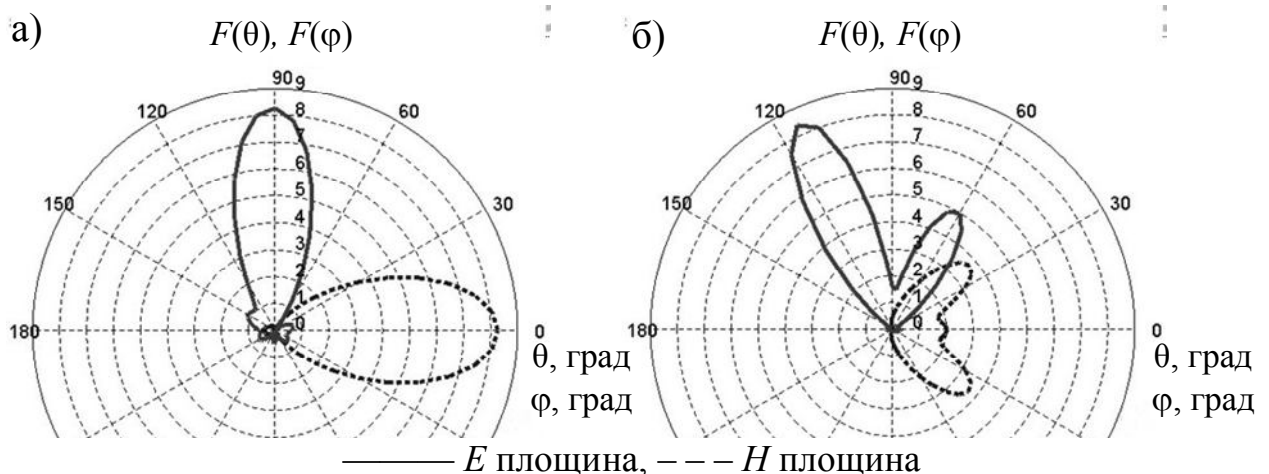


Рис. 6. Діаграма спрямованості багатодіапазонної антени з короткозамикачем для частот а) 0,9 ГГц б) 1,8 ГГц

Для поліпшення узгодження розглянуті нові структури з нахилом випроміню-

вача щодо екрану. У цьому випадку забезпечується постійність відносини $w/h_{\text{и}}$ уздовж структури випромінювача, і отже забезпечується постійність хвильового опору неоднорідному НПЛ. Для випромінювача у вигляді структури Серпінського з урахуванням позначень на рис. 7 отримуємо, що кут нахилу структури визначається формулою

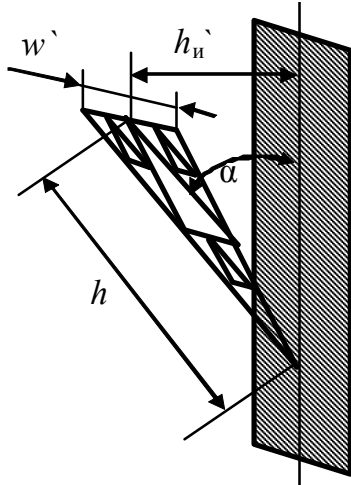


Рис. 7. Планарна антена на основі структури Серпінського з нахилом випромінювача

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{2 \operatorname{tg} \frac{\pi}{6}}{\frac{w'}{h_{\text{и}}}} \right). \quad (9)$$

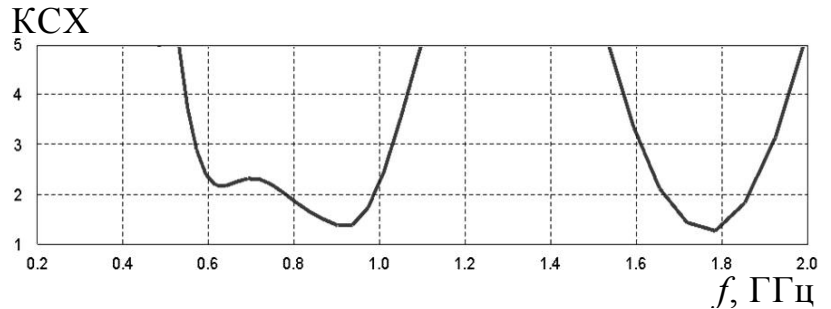


Рис. 8. Частотна залежність КСХ антени з нахилом випромінювача

Оскільки для забезпечення хвильового опору $Z_{\text{в}} = 50$ Ом необхідно забезпечити відношення $w/h_{\text{и}} = 4,93$, то за формулою (9) отримуємо, що $\alpha = 13,6^\circ$. Результати розрахунку характеристик антени з нахилом випромінювача наведено на рис. 8 та рис. 9. Рівень крос поляризації в цьому випадку на частоті 0,9 ГГц становив -30 дБ, на частоті 1,8 ГГц — -28 дБ.

Очевидно, що варіант планарної антени з нахилом випромінювача забезпечує поліпшення характеристик узгодження та випромінювання (найкраще узгодженням забезпечується при куті близько 15°).

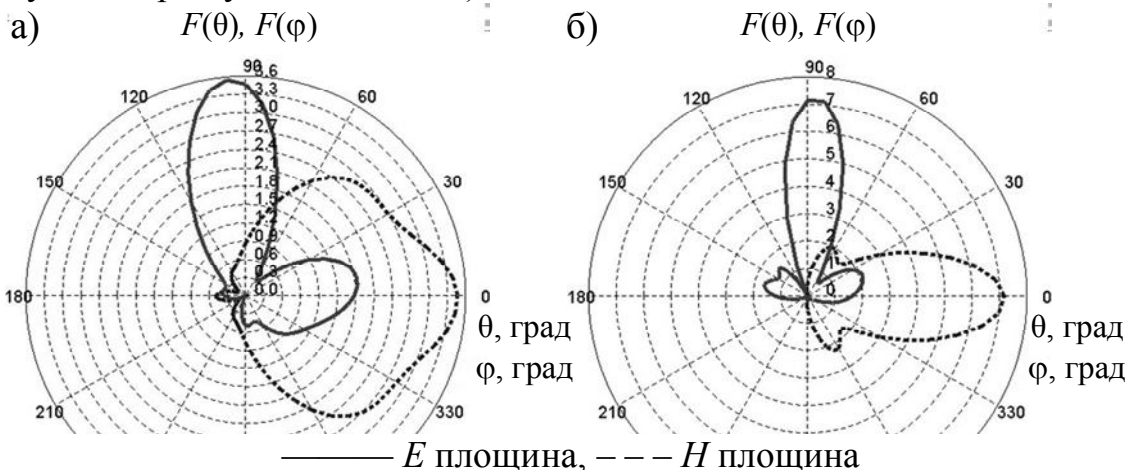


Рис. 9. Діаграма спрямованості багатодіапазонної антени з короткозамикачем та нахиленим випромінювачем для частот а) 0,9 ГГц б) 1,8 ГГц

Запропонована фрактальна антена кругової поляризації (рис. 10). Вершина 1 плоского випромінювача трикутної форми збуджується струмом з фазою 0° , вершина 2 — струмом з фазою 120° ; вершина 3 — струмом з фазою 240° . У такому випадку, сумарне електромагнітне поле антени в режимі випромінювання матиме кругову

поляризацію, оскільки вектора парціальних полів, збуджуваних різними вершинами, також зрушені на 120° відносно один одного в просторі.

Виконано моделювання планарної антени кругової поляризації в САПР *FEKO*. Для прикладу на рис. 11 наведені частотна залежність КСХ трикутної антени кругової поляризації, а на рис. 12 зображена діаграма спрямованості на частоті 900 МГц. Коефіцієнт еліптичності трикутної антени кругової поляризації в напрямку максимуму діаграма спрямованості становить $-2,6$ дБ.

Шляхом моделювання в САПР *FEKO* встановлено можливість зміни профілю випромінювача багатодіапазонної антени кругової поляризації з метою поліпшення характеристик узгодження.

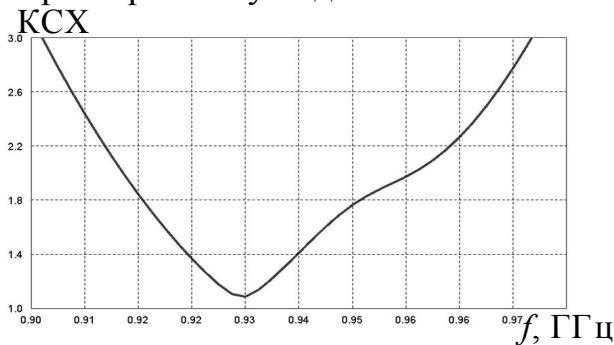


Рис. 11. Частотна залежність КСХ антени кругової поляризації

У третьому розділі проведено дослідження багатодіапазонних планарних антен методом інтегральних рівнянь, яка заснована на чисельному рішенні інтегральних рівнянь за методом моментів в програмі *MATLAB*. Деякі результати розрахунку наведені далі.

На рис. 13 зображена структура двохдіапазонної антени, представлена у вигляді точкових елементів. Довжина випромінювача антени 0,145 м, екран виконаний у вигляді квадрата з розміром сторони 0,335 м, відстань між випромінювачем і екраном 0,018 мм. Для обраної геометрії використано 523 підобластей, відстань між центрами підобластей 0,015 мм, що задовольняє вимогу щодо максимального розміру елементарної підобласті $\lambda/8$. На рис. 14 зображена діаграма розподілу струмів (у відносних одиницях) по підобластях. На випромінювачі розташовані підобласті з номерами 1...123 (ліва частина діаграми), а на екрані підобласті з номерами 123...523 (права частина діаграми).



Рис. 10. Планарна багатодіапазонна антена кругової поляризації

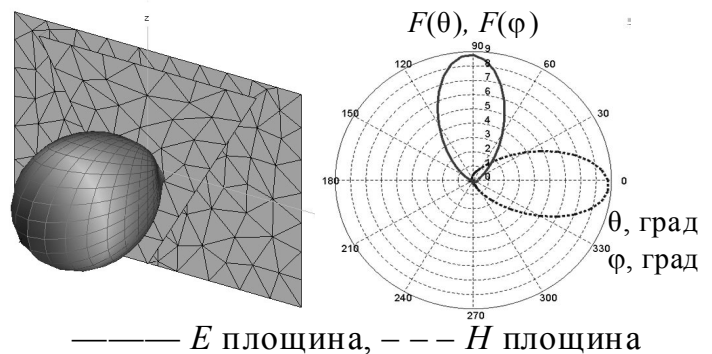


Рис. 12. Діаграми спрямованості антени кругової поляризації на частоті 900 МГц

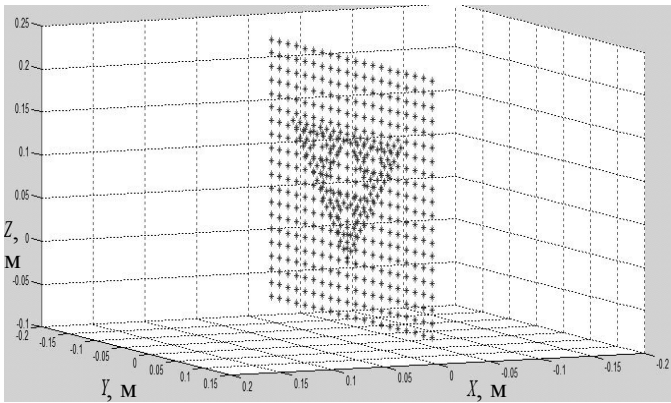


Рис. 13. Модель фрактальної антени в програмі *MATLAB*

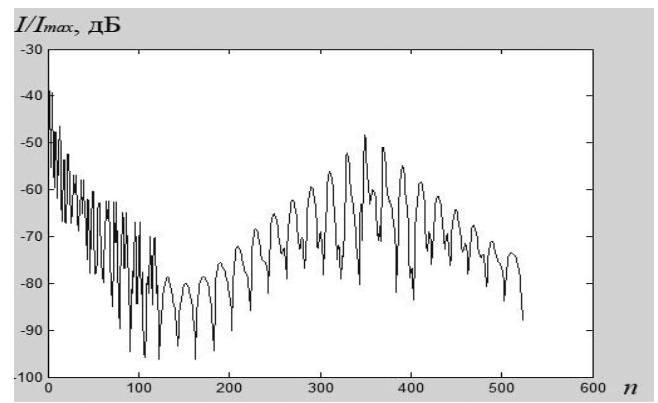


Рис. 14. Розподіл модуля струмів на частоті 900 МГц

З рис. 14 видно, що струми з більшою амплітудою зосереджені на елементах з номерами від 1 до 15, ці елементи є елементами випромінювача антени. На поверхні екрану максимальне значення струмів набувають елементи з номерами від 340 до 350, ці елементи знаходяться на екрані поблизу точки збудження.

На рис. 15 а) показаний тривимірний графік розподілу струмів по поверхні випромінювача. На рис. 16 зображена нормована ДС на частоті 900 МГц. Характер ДС у основному напрямку однопелюстковий з максимумом випромінювання в напрямку 90° (ортогонально площині екрану антени).

Також розглянуті характеристики антени при роботі на частоті 1800 МГц. На рис. 15 б) представлений тривимірний графік розподілу поля по поверхні випромінювача, на рис. 16 — нормована ДС антени. ДС на частоті 1800 МГц в основному напрямку має двухпелюсткову структуру з максимумами у напрямках 45° та 110° .

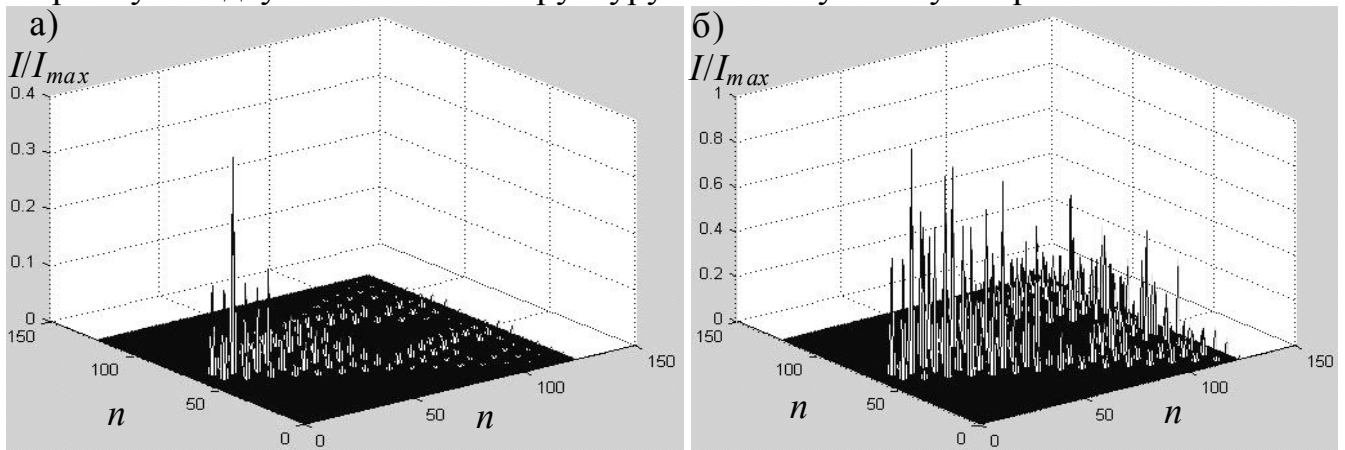


Рис. 15. Розподіл струму по поверхні випромінювача багатодіапазонної фрактальної антени: (а) на частоті 900 МГц, (б) на частоті 1800 МГц

У цілому отримані методом інтегральних рівнянь ДС збігаються з результатами отриманими за допомогою САПР *FEKO* (див. рис. 6).

Таким чином, розроблена методика та математична модель може досить точно описати характеристики антен — розподіл струмів на поверхні та ДС.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи наводяться характеристики макетів антен (фрактальної антени лінійної поляризації (випромінювач якій розташований перпендикулярно площині екрану), модифікованої фрактальної антени лінійної поляризації (випромінювач якій розташований перпендикулярно площині екрану),

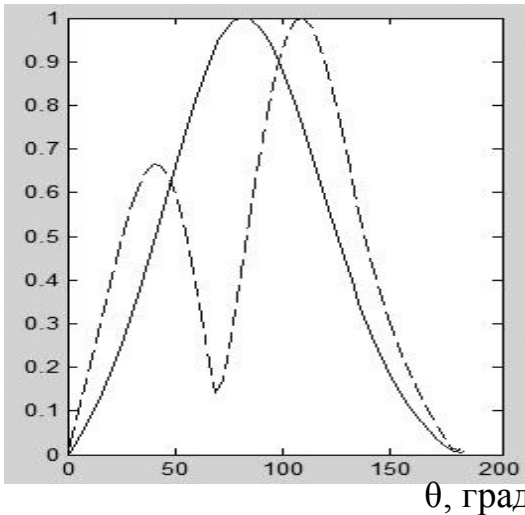
$F(\theta)$ 

Рис. 16. Діаграма спрямованості багатодіапазонної планарної антени на — частоті 900 МГц, — — частоті 1800 МГц

площини. Ширина головного пелюстка ДС складала: в E -площині — $43...51^\circ$; в H -площині — $61...65^\circ$. Антена на частоті 915 МГц забезпечує коефіцієнт підсилення не менш як 10 дБ.

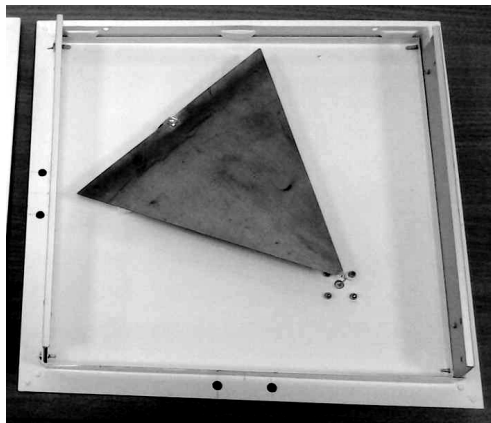


Рис. 17. Антена лінійної поляризації

КСХ

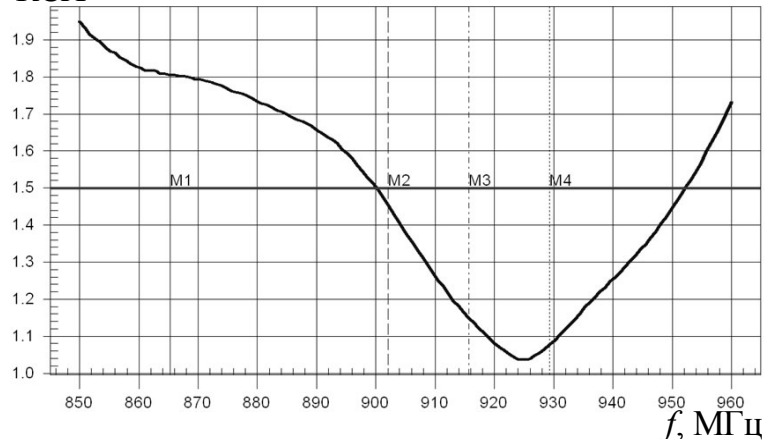
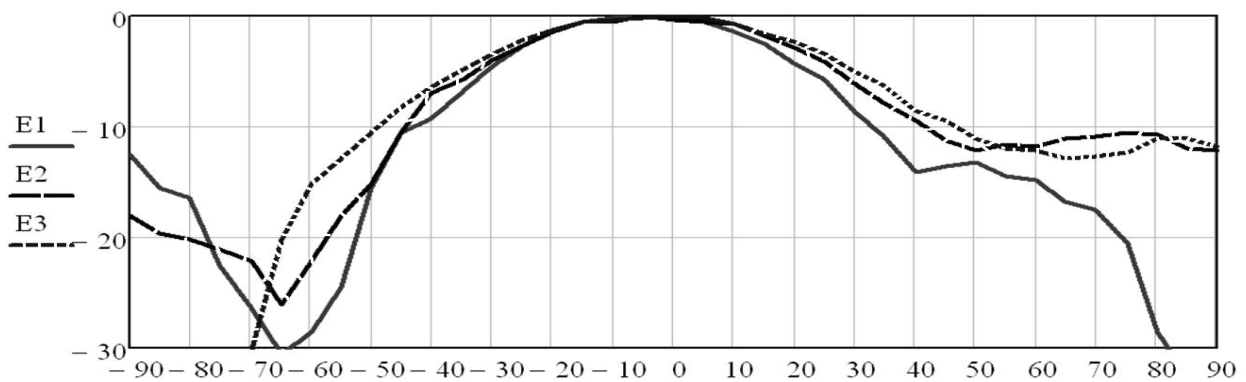


Рис. 18. Частотна залежність КСХ антени лінійної поляризації



E1 — частота 902 МГц, E2 — частота 915 МГц, E3 — частота 928 МГц

Рис. 19. Діаграма спрямованості трикутної антени лінійної поляризації в E площині

логоперіодична фрактальної антени лінійної поляризації (випромінювач якій розташований перпендикулярно площині екрану), площинної фрактальної антени лінійної поляризації (випромінювач якій розташований паралельно площині екрану, а також під кутом до площини екрану), трикутної антени кругової поляризації), результати обробки експериментальних досліджень та зіставлення їх із результатами моделювання.

Так наприклад, частотна залежність КСХ трикутної антени лінійної поляризації (висота випромінюючого елемента антени — 0,185 м., габарити екрана $0,32 \times 0,32$ м., рис. 17) наведено на рис. 18. Антена забезпечує рівень КСВ $< 1,5$ в діапазоні 900 ... 952 МГц.

ДС трикутної антени лінійної поляризації в діапазоні частот наведена на рис. 19 для E -

Результати експериментального дослідження для трикутної антени показують можливість практичного використання антен, виконаної на основі фрактальної структури в одночастотному варіанті.

На рис. 20 зображений макет багатодіапазонної антени лінійної поляризації. Протяжність (відстань між точкою підключення випромінювача і крайками отворів) утворюють трикутників для випромінюючого елемента: 4,5; 9; 17,5; 18,5 см.

Антену забезпечує узгодження в діапазоні частот 1900 МГц при КСХ < 2 . Крім того в діапазонах частот 450 МГц і 900 МГц спостерігається наближення до рівня КСХ близько 5...6.

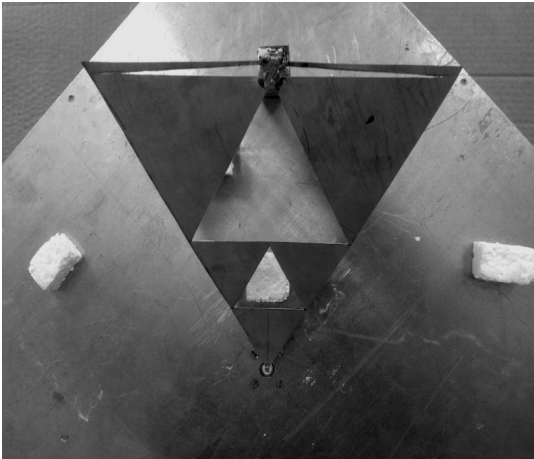
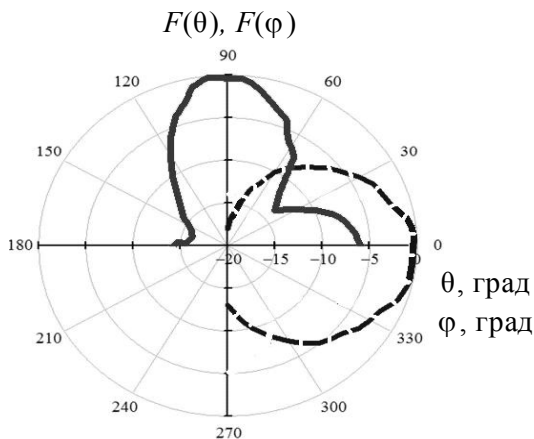


Рис. 20. Модифікована фрактальна антена лінійної поляризації

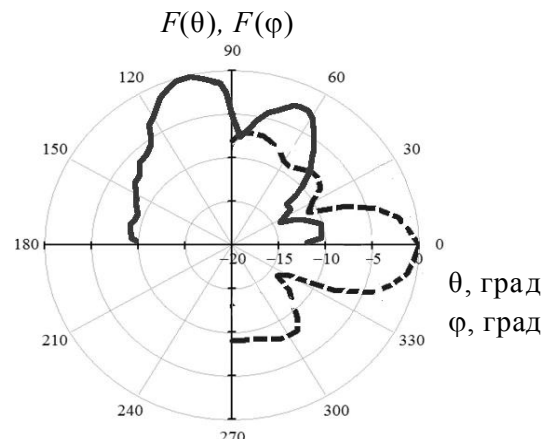
ДС площинного варіанту модифікованої фрактальної антени лінійної поляризації наведено на рис 21 для частоти 900 МГц і рис. 22 для частоти 1900 МГц. Рівень крос поляризації на частоті 0,9 ГГц складає -36 дБ на частоті 1,9 ГГц — -26 дБ. Характер ДС на частоті 900 МГц (рис. 21) в основному напрямку має однопелюсткову структуру з максимумом орієнтованим ортогонально площині відносно площини антени при коефіцієнті посилення не менш 9,5 дБ.

Характер ДС на резонансній частоті 1800 МГц (рис. 22) в основному напрямку має порізаний характер при коефіцієнті посилення не менш 11 дБ.



E ——— ; H - - - - - площина

Рис. 21. Діаграма спрямованості модифікованої фрактальної антени лінійної поляризації на частоті 900 МГц



E ——— ; H - - - - - площина

Рис. 22. Діаграма спрямованості модифікованої фрактальної антени лінійної поляризації на частоті 1900 МГц

Дана характеристика випромінювання збігається з отриманими раніше в пакеті електродинамічного аналізу *FEKO* (рис. 6), а також з, результатами отриманими на основі програми розробленої в пакеті *MATLAB* (рис. 16), яка заснована на чисельному рішенні інтегрального рівняння. Таким чином, результати, отримані трьома різними способами, збігаються, що підтверджує розроблену методику розрахунку планарних багатодіапазонних антен.

Подальше дослідження проводилося з варіантом антени, у якої випромінюючий елемент нахилений відносно площини екрану на кут 15° . Частотна залежність КСХ

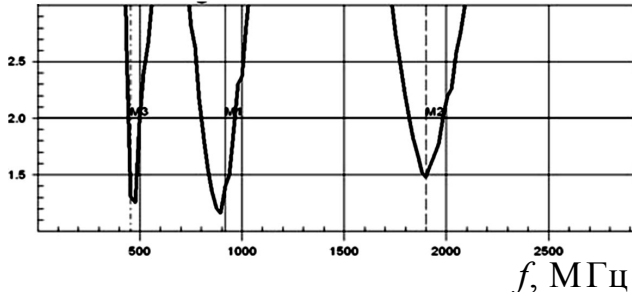


Рис. 23. Частотна залежність КСХ модифікованої фрактальної антени з нахилом випромінювача

Результати експериментального дослідження нового варіанту планарної антени кругової поляризації рис. 24 розглянуті далі.

Живлення антени здійснювалося з коаксіального входу, реалізованого у вигляді високочастотного роз'єму N типу. Відстань між випромінювачем і екраном вибрано рівним 0,02 м. Конструктивно екран і схема формування фаз виконані у вигляді єдиного вузла з використанням високочастотного фольгованого матеріалу. При цьому смужкові лінії реалізовані на внутрішній стороні екрану (орієнтовані до поверхні випромінювача). Випромінювач виконаний у вигляді трикутника (фрактала першого порядку) з висотою 0,18 м. Габарити екрану 0,2×0,26 м. Частотна залежність КСХ площинного варіанту антени кругової поляризації наведена на рис. 25.



Рис. 24. Макет площинної антени кругової поляризації

Антенa забезпечує узгодження в діапазоні частот 835...1000 МГц при КСХ < 1,5. У діапазонах частот 902...928 МГц забезпечується КСХ < 1,3. Приклад ДС площинної антени кругової поляризації наведені на рис. 26 для площини 0° .

Результати вимірювань площинного варіанту модифікованої фрактальної антени для частот 902, 915 і 928 МГц показують, антена кругової поляризації фор-

КСХ площинного варіанту модифікованої фрактальної антени лінійної поляризації з нахилом випромінювача приведена на рис. 23.

Результати експерименту підтверджують можливість поліпшення узгодження антени в діапазонах 450 і 900 МГц шляхом нахилу випромінювача та застосування короткозамикаючого елемента, що дозволило забезпечити КСВ < 2 для трьох частотних діапазонів.

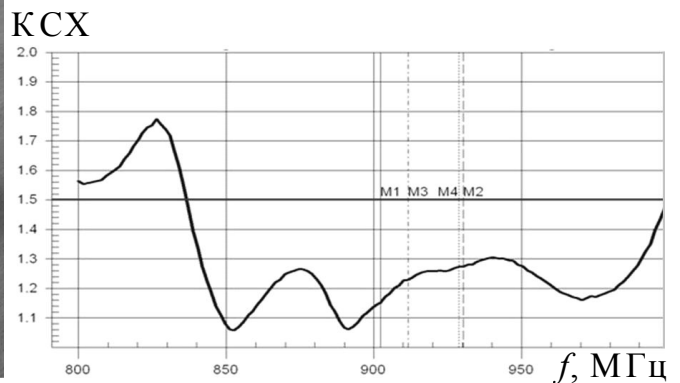


Рис. 25. Частотна залежність КСХ площинної антени кругової поляризації

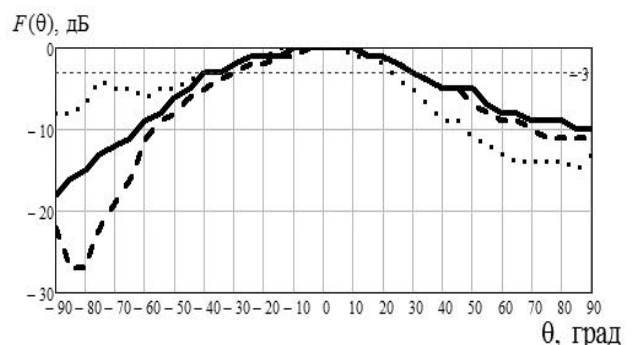


Рис. 26. Діаграма спрямованості трикутної антени кругової поляризації в площині 0°

мує головний пелюсток осесиметричної форми. Зміна ширини головного пелюстка в діапазоні частот не перевищує 5° . Коефіцієнт еліптичності в напрямку максимуму ДС складає 2 дБ. Коефіцієнт посилення в діапазоні частот становить 7...9 дБ.

Отримані характеристики підтвердили припущення про можливість формування поля кругової поляризації за допомогою використання структури Серпінського.

ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень у дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача з розробки та дослідження слабоспрямованих багатодіапазонних антен лінійної та кругової поляризації на основі використання фрактальних структур завдяки застосуванню сіткової моделі при використанні методу інтегральних рівнянь і методу колокацій, що дозволило створити нові варіанти багатодіапазонних антен і виконати їх дослідження без застосування спеціалізованих САПР.

Основні наукові результати і висновки полягають в наступному:

1. Отримана інженерна формула для розрахунку резонансних частот багатодіапазонної антени з прямокутними отворами.
2. Розроблені варіанти планарних антен на основі фрактальної структури Серпінського і квазіфрактальної структури з нахиленим випромінювачем, які на відміну від планарних антен без нахилу випромінювача забезпечують кращий рівень узгодження і формування спрямованого випромінювання.
3. Розроблено новий варіант багатодіапазонної фрактальної антени кругової поляризації на основі структури Серпінського і визначено можливість поліпшення вхідних характеристик антени при використанні випромінювача з нелінійним профілем.
4. Розроблена математична модель та алгоритм визначення геометрії фрактальних структур Серпінського і квазіфрактальних структур на основі систем ітеріруємих функцій.
5. На основі запропонованої сіткової моделі у вигляді набору дротяних випромінювачів розроблено методику визначення характеристик випромінювання плоских одно і багатодіапазонних антен шляхом чисельного рішення за допомогою інтегральних рівнянь методом моментів при використанні методу колокацій.
6. Створено прикладне програмне забезпечення в середовищі MATLAB для розрахунку характеристик випромінювання фрактальних і квазіфрактальних антен, яке здатне проаналізувати електродинамічні характеристики антен без залучення спеціалізованих САПР, і на відміну від існуючих САПР виконує розрахунок швидше.
7. Розроблені та експериментально досліджені макети багато діапазонних фрактальних і квазіфрактальних антен. В результаті експериментальних досліджень підтверджено достовірність запропонованих математичних моделей і показана можливість практичної реалізації планарних антен з лінійною і круговою поляризацією поля випромінювання.

Результати роботи рекомендуються для впровадження в промислових і науково-дослідних організаціях, здійснюючих розробку і виробництво багатодіапазонних

антенн для телекомунікаційних систем.

Завданням подальшого дослідження є: поліпшення характеристик узгодження, зменшення рівня КСХ, а також розширення робочої смуги частот; уточнення математичної моделі на основі інтегральних рівнянь, аналіз отриманих результатів дослідження.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Нудьга А.А. Исследование многодиапазонных фрактальных антенн / А.А Нудьга, А.А. Савочкин // Вісник СевНТУ Сер. Інформатика, електроніка, зв'язок : збірн. наук. пр. — Севастополь, 2011. — № 114. — С. 142—149.
2. Нудьга А.А. Исследование периодической квазифрактальной антенны / А.А Нудьга, А.А. Савочкин // Збірн. наук. праць Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова. — Севастополь, 2011. — № 3(7). — С. 82—89.
3. Нудьга А.А. Использование теории фракталов при разработке частотно-независимых антенн / А.А Нудьга, А.А. Савочкин // Збірн. наук. праць Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова. — Севастополь, 2011. — № 4(8). — С. 91—97.
4. Нудьга А.А. Электродинамика многодиапазонной антенны / А.А Нудьга // Вісник НТУ КПП Сер. Радіотехніка радіоапаратобудовання: збірн. наук. пр. — К., 2012. — № 49. — С. 114—121.
5. Нудьга А.А. Метод определения поверхностных токов и поля излучения плоскостной антенны / А.А Нудьга // Вісник СевНТУ Сер. Інформатика, електроніка, зв'язок : збірн. наук. пр. — Севастополь, 2012. — № 131. — С. 148—154.
6. Нудьга А.А. Фрактальная проволочная антенна на основе салфетки Серпинского / А.А. Савочкин, А.А. Нудьга, А.А. Безгин // Збірн. наук. праць Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова. — Севастополь, 2013. — № 3 (15). — С. 90—97.
7. Нудьга А.А. Методика определения геометрии многодиапазонных антенн / А.А. Нудьга, А.А. Савочкин // Отраслевые аспекты технических наук : научно-практический журнал. — М., 2011. — № 12. — С. 20—23.
8. Нудьга А.А. Построение квазифрактальной излучающей структуры по изображению заданного объекта / А.А. Нудьга, Д.В. Начаров // Отраслевые аспекты технических наук : научно-практический журнал. — М., 2012. — №6(18). — С. 21—23.
9. Нудьга А.А. Исследование логарифмической антенны на основе фрактальной антенны Серпинского / А.А. Нудьга // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ — 2011» : 7-а Міжнарод. молодіж. наук.-техніч. конф., 11-15 квіт. 2011 р. : тези доп. — Севастополь., 2011. — С. 247.
10. Нудьга А.А. Оценочная модель определения диаграммы направленности телекоммуникационной антенны Серпинского / А.А. Нудьга, А.А. Савочкин // Проблеми телекомунікацій : 5-а Міжнарод. наук.-техніч. конф. і 3-я студентська наук.-техніч. конф., 19-22 квіт. 2011 р. : тези доп. — К., 2011. — С. 151.
11. Nudga A.A. The multiband antenna / A.A. Nudga, A.A. Savochkin // Antenna theory and techniques : 8-th International conference, 20-23 sept. 2011. : report theses. — К., 2011. — P. 182—184.

12. Нудьга А.А. Исследование многодиапазонной антенны на основе фрактальной антенны Серпинского / А.А. Нудьга // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті : 15-ий Міжнарод. молодіж. форум, 18-20 квіт. 2011 р. : тези доп. — Х., 2011. — С. 20—21.
13. Nudga A.A. Method for determining the geometry of multi-band antennas / А.А. Нудьга // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: 11-th International conference, 21-24 febr. 2012. : report theses. — Lviv, 2012. — P. 182—183.
14. Нудьга А.А. Электродинамика многодиапазонной антенны / А.А. Нудьга // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіти) : Міжнарод. наук.-техніч. конф., 22-29 лют. 2012 р, : тези доп. — К., 2012 — С. 147—148.
15. Нудьга А.А. Многодиапазонная антенна на основе фрактальной геометрии / А.А. Нудьга, Т.Г. Стороженко, Н.С. Гирченко, А.А. Савочкин // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ — 2012» : 8-а Міжнарод. молодіж. наук.-техніч. конф., 23-27 квіт. 2012 р. : тези доп. — Севастополь, 2012. — С. 226.
16. Нудьга А.А. Метод расчета поля излучения многодиапазонной антенны в дальней зоне / А.А. Нудьга, Стороженко Т.Г., Савочкин А.А. // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ — 2012» : 8-а Міжнарод. молодіж. наук.-техніч. конф., 23-27 квіт. 2012 р. : тези доп. — Севастополь, 2012. — С. 249.
17. Нудьга А.А. К вопросу нахождения поля в дальней зоне — преобразование координат / А.А. Нудьга // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті : 16-ий Міжнарод. молодіж. форум, 17-19 квіт. 2012 р. : тези доп. — Х., 2012. — С. 41—43.
18. Нудьга А.А. Определение диаграммы направленности плоскостной антенной структуры / А.А. Нудьга // Проблеми телекомунікацій : 6-а Міжнарод. наук.-техніч. конф. і 4-а студент. наук-техніч. конф., 24-27 квіт. 2012 р. : тези доп. — К., 2012. — С 356—358.
19. Нудьга А.А. Определение поля излучения многодиапазонной антенны / А.А. Нудьга, А.А. Савочкин // СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології «Кри-МіКо-2012»: 22-га Міжнарод. Кримська конф., 10-14 верес. 2012 р. : тези доп. — Севастополь, 2012. — С. 499—500.
20. Nudga A.A. Calculation method of radiation multi-band antennas in the far field / А.А. Nudga, А.А. Savochkin // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals «UWBUSIS-12» : 6-th International conference 17-22 sept. 2012. : report theses. — Sevastopol., 2012. — P. 189—191.
20. Нудьга А.А. Исследование самоподобных патч-антенн / А.А. Нудьга // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ — 2013» : 9-а Міжнарод. молодіж. наук.-техніч. конф., 23-26 квіт. 2013 р. : тези доп. — Севастополь, 2013. — С. 231.
22. Нудьга А.А. Треугольная антенна линейной поляризации / А.А. Нудьга, А.А. Савочкин // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіти) : Міжнарод. наук.-техніч. конф., 11-15 берез. 2013 р. : тези доп. — К., 2013. — С. 103 — 104.

23. Нудьга А.А. Плоскостная двухдиапазонная антенна / А.А. Нудьга // Проблеми телекомунікацій : 7-а Міжнарод. наук.-техніч. конф. і 5-а студентськ. наук.-техніч. конф., 16-19 квіт. 2013 р. : тези доп. — К., 2013. — С. 200 — 203.
24. Нудьга А.А. Плоская двухдиапазонная антенна линейной поляризации / А.А. Нудьга // Радіoeлектроніка і молодь в ХХІ столітті : 17-ий Міжнарод. молодіж. форум, 22-24 квіт. 2013 р. : тези доп. — Х., 2013. — С. 19—20.
25. Нудьга А.А. Двухдиапазонная антенна / А.А. Нудьга, А.А. Савочкин, А.А. Слободенюк., А.А. Безгин // СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології «КриМіКо-2013» : 23-я Міжнарод. Кримська конф., 8-13 верес. 2013 р. : тези доп. — Севастополь, 2013. — С. 614 — 616.
26. Нудьга А.А. Многодиапазонная антенна с модифицированным экраном / А.А. Нудьга // СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології «КриМіКо-2013» : 23-я Міжнарод. Кримська конф., 8-13 верес. 2013 р. : тези доп. — Севастополь, 2013. — С. 612—614.
27. Nudga A.A. The antenna for standards of IEEE 802.11 a/b/g/n / A.A. Nudga, A.A. Savochkin // Antenna theory and technigues : 9-th International conference., 16-20 sept. 2013. : International conference — Odessa. — P. 402—404.
28. Нудьга А.А. Исследование трехдиапазонной антенны / А.А. Нудьга // Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті: Збірн. наук. праць по мат. Міжнарод. конф, 20-27 груд. 2011 р. : тези доп. — Одеса, 2011. — С. 18—20.
29. Нудьга А.А. Исследование влияния геометрии возбуждающей щели на входные характеристики антенны / А.А. Нудьга, А.А. Савочкін // Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті : Збірн. наук. праць по мат. Міжнарод. конф, 20-27 груд. 2011 р. : тези доп. — Одеса, 2011. — С. 20—23.
30. Нудьга А.А. Применение аффинного преобразования для расчета геометрии многодиапазонных антенн / А.А. Нудьга, В.О. Маєвський // Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті : Збірн. наук. праць по мат. Міжнарод. конф, 20-27 груд. 2011 р. : тези доп. — Одеса, 2011. — С. 79—81.

АНОТАЦІЯ

Нудьга А.А. Многодиапазонные антенны на основе фрактальных структур. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 — Антени та пристрої мікрохвильової техніки. — Харківський національний університет радіoeлектроніки, Харків, 2014.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень у дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача з розробки та дослідження слабоспрямованих багатодіапазонних антен лінійної та кругової поляризації на основі використання фрактальних структур завдяки застосуванню сіткової моделі при використанні методу інтегральних рівнянь і методу колокацій, що дозволило створити нові варіанти багатодіапазонних антен і виконати їх дослідження без застосування спеціалізованих САПР.

Обґрунтовано математичну модель, яка дозволяє шляхом чисельного моделю-

вання методом інтегральних рівнянь визначити електродинамічні характеристики планарних багатодіапазонних антен, виконаних на основі фрактальних структур. Запропоновано методику визначення геометрії багатодіапазонної планарної антени з нахиленим випромінювачем, яка заснована на уявленні антени у вигляді неоднорідної несиметричної полозкової лінії. Адекватність запропонованої методики підтверджена результатами комп'ютерного моделювання та експериментальними дослідженнями. Запропонована планарна багатодіапазонна антена кругової поляризації на основі використання фрактальної структури Серпінського, яка була промодельована в САПР і досліджена експериментально.

Достовірність наукових результатів і висновків, сформульованих у дисертації, доведено експериментальною перевіркою основних наукових положень роботи.

Ключові слова: багатодіапазонна антена, метод інтегральних рівнянь, метод моментів, фрактальна антена, поляризація випромінювання, квазіфрактальна періодична антена, антена на основі структури Серпінського кругової поляризації.

АННОТАЦИЯ

Нудьга А.А. Многодиапазонные антенны на основе фрактальных структур. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 — Антенны и устройства микроволновой техники. — Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В результате теоретических и экспериментальных исследований в диссертации решена актуальная научно-прикладная задача по разработке и исследованию слабонаправленных многодиапазонных антенн линейной и круговой поляризации на основе использования фрактальных структур благодаря применению сеточной модели при использовании метода интегральных уравнений и метода коллокаций, что позволило создать новые варианты многодиапазонных антенн и выполнить их исследования без применения специализированных САПР.

Обоснована математическая модель, которая позволяет путем численного моделирования методом интегральных уравнений определить электродинамические характеристики планарных многодиапазонных антенн, выполненных на основе фрактальных структур. Предложена методика определения геометрии многодиапазонной планарной антенны с наклоненным излучателем, основанная на представлении антенны в виде неоднородной несимметричной полосковой линии. Адекватность предложенной методики подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментальными исследованиями. Предложена планарная многодиапазонная антенна круговой поляризации на основе использования фрактальной структуры Серпинского, которая была промоделирована в САПР и исследована экспериментально.

Достоверность научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, доказано экспериментальной проверкой основных научных положений работы.

Ключевые слова: многодиапазонная антенна, метод интегральных уравнений, метод моментов, фрактальная антенна, поляризация излучения, квазифрактальная

періодическа антенна, антенна на основі структури Серпинського кругової поляризації.

ABSTRACT

Nudga A.A. Multirange antennas based on fractal structures. — a Manuscript.

Thesis for the candidate's degree by specialty 05.12.07 — Antennas and microwave devices. — Kharkov national university of radio electronics, Kharkov, 2014.

As a result of theoretical and experimental research the actual scientific problem of development and investigation of multi-band low-gain linear and circular polarization antennas based on fractal structures is solved by means of grid model application in integral equations method and collocations method, which have been allowed to create new variants of multi-band antennas and to investigate them without using of specialized CAD.

The mathematical model allowing to determine the electrodynamics characteristics of planar multi-band antennas, made on the basis of fractal structures, by numerical simulation method of integral equations is substantiated. The method of determining the geometry of a multi-band planar antenna with a tilted screen, based on representation of the antenna in the form of inhomogeneous asymmetric strip line, is proposed. The adequacy of the proposed method is confirmed by results of computer simulation and experimental studies. The proposed planar multiband circular polarization antenna based on Sierpinski fractal structure is modeled in CAD and is investigated experimentally.

Validity of scientific results and conclusions formulated in the dissertation is proved by experimental check.

The Keywords: multi-band antenna, the method of integral equations, the method of moments, the fractal antenna polarization is quasi fractal periodic antenna, antenna based on the structure of Sierpinski with circular polarization.

Підп. до друку 13.02.14.
Умов. друк. арк. 1,3
Зам. № 141896

Формат 60x84 ¹/₁₆
Тираж 100 прим.
Ціна договірна.

Спосіб друку — ризографія

99011, м. Севастополь, вул. Кулакова, б. 59

Віддруковано у типографії «Printex».