

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРИВ

SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

PASC 84.40.Ba

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355910>

МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ І МІНІАТЮРИЗАЦІЇ ВИПРОМІНЮВАЧІВ (ОГЛЯД)

Я. І. Лепіх, <https://orcid.org/0000-0001-6769-835X>

А. О. Карпенко, <https://orcid.org/0009-0002-9577-9928>

А. П. Балабан, <https://orcid.org/0000-0002-6372-479X>

Науково-дослідний інститут фізики
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, 65082, Україна
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Анотація. Проведено аналіз розвитку фрактальних методів в електродинаміці для удосконалення перетворювачів, головним чином на прикладі антен з акцентом на їх інтеграцію в безпілотні літальні апарати (БПЛА). Ключова проблема проектування таких антен полягає у протиріччі між вимогами надширокополосності (400–7000 МГц) і жорсткими обмеженнями на масогабаритні та аеродинамічні характеристики, яким традиційні геометричні параметри не відповідають.

Проаналізовано гібридні підходи, що об'єднують геометрії Коха, Серпінського та Мінківського, а також способи розширення смуги пропускання через використання дефектних структур заземлення (DGS) та метаматеріалів.

Виявлено спеціалізовані конструкції, такі як FeathR™, оптимізовані для радіоелектронних завдань боротьби при збереженні низької радіолокаційної видимості. Представлені в огляді рішення підтверджують можливість ефективного безперервного покриття спектру частот від 400 МГц до 7 ГГц та вище.

Ключові слова: фрактальні методи, управління діаграмою спрямованості, мініатюризація антен, дефектні структури заземлення

Вступ

Фрактальна електродинаміка відкриває нові можливості для вирішення проблем удосконалення перетворювачів різних за принципами побудови і призначення, використовуючи принципи самоподібності та заповнення простору для створення електрично довгих структур в обмеженому фізичному обсязі [1].

Наведемо кілька прикладів. В електроніці для підвищення ємності конденсаторів необхідно збільшувати площу поверхні електродів. Застосування фрактальних візерунків при проектуванні електродів дозволяє максимізувати цю площу, зберігаючи компактність виробу. [2]. В авіабудуванні [3] фрактальні структури використовуються для зниження аеродинамічного опору. Фрактальні принципи застосовуються і при створенні акустичних метаматеріалів для ефективної вібро- та звукоізоляції. Впровадження фрактальної геометрії (наприклад, ієрархічних стільників) у структуру метаматеріалу дозволяє гнучко налаштувати його характеристики: змінювати коефіцієнт Пуассона, керувати положенням та шириною заборонених зон [4].

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) протягом останнього десятиліття характеризується переходом від простих радіокерованих моделей до складних автономних систем, що вимагають високошвидкісної передачі даних, стійкості до перешкод та багатодіапазонної роботи. Одним із ключових компонентів цього технологічного стрибка є бортова антенна система, що визначає дальність зв'язку, рівень радіомаскування та ефективність управління бортом БПЛА [5].

Традиційні евклідові геометрії антен часто виявляються нездатними задовольнити суперечливі вимоги до БПЛА: мала вага, компактність, аеродинамічна обтічна форма і надширокополосність в діапазоні 400-7000 МГц.

1. Основи фрактальної електродинаміки та управління частотним спектром

Нагадаємо – **Фрактал** – це геометричний об'єкт, що рекурсивно генерується, має дро-

бову розмірність і властивість самоподібності. Фрактальна фігура складається з частин, кожна з яких є зменшеною копією всієї структури загалом [1, 6].

Основні переваги від застосування теорії фракталів у проектуванні НВЧ-антен наступні.

Мініатюризація: Властивість заповнення простору дозволяє розмістити велику електричну довжину провідника в малому фізичному обсязі, що значно зменшує габарити антени без втрати резонансних властивостей [1, 6, 7].

– **Багатодіапазонність:** Завдяки самоподібній структурі антена може працювати на кількох частотах одночасно, які не обов'язково є кратними гармоніками, що ідеально підходить для мультистандартних систем зв'язку.

– **Широкополосність:** Складна порізана форма фракталів створює додаткові резонансні шляхи, що дозволяє антені ефективно працювати у дуже широкому діапазоні частот.

– **Стабільність характеристик:** Фрактальні конструкції (наприклад, синусоїдальні) можуть зберігати постійну діаграму спрямованості (ДС), посилення та вхідний опір у всьому робочому діапазоні [8].

– **Поліпшення посилення та коефіцієнта корисної дії (ККД):** Фрактальні структури часто забезпечують вищий коефіцієнт посилення та ефективність випромінювання порівняно з класичними з евклідовою геометрією антенами того ж розміру.

– **Зниження взаємного впливу:** У фазованих антенних ґратах використання фракталів допомагає зменшити небажаний електромагнітний зв'язок між окремими елементами [8, 9].

– **Спрощення ланцюгів узгодження:** Геометрія фракталу може виступати в ролі розподіленої ємності або індуктивності, що дозволяє узгодити антену з трактом без використання додаткових зовнішніх компонентів.

Фрактальні антени базуються на концепції геометрії з дробовою розмірністю, запропонованою Бенуа Мандельбротом [7]. Для антени найбільш важливими є дві властивості фракталів: самоподібність і здатність до заповнення простору [1, 6, 7].

Незважаючи на очевидні переваги, фрактальні антени стикаються із низкою проблем. Складність геометрії потребує прецизійних методів виготовлення, таких як лазерне пряме структурування (LDS) або аерозольний друк [10]. З іншого боку, зі збільшенням кількості ітерацій фрактала ефект мініатюризації уповільнюється, а втрати у провіднику зростають через збільшення електричної довжини [11].

Самоподібність дозволяє антені резонувати на кількох частотах, які масштабуються відповідно до ітерацій фрактальної структури, що забезпечує багатодіапазонність. Властивість заповнення простору дозволяє збільшити довжину шляху струму поверхні випромінювача, що знижує резонансну частоту антени за збереження її габаритних параметрів, сприяючи мініатюризації [7, 6, 12].

Проектування фрактальних антен в останнє десятиліття базувалося на системі ітераційних функцій (Iterated Function Systems (IFS)). Кожна ітерація додає нових резонансних рішень, розширюючи смугу пропускання [6].

Процес створення фрактальної антени завжди складається із двох елементів:

1. "Ініціатор" - вихідна проста фігура (нульова ітерація). Для дротяних антен це звичайний прямий відрізок лінії, для патч-антен – квадрат або трикутник.

2. "Генератор": - геометричне "правило", яке застосовується до ініціатора на кожному кроці. Генератор визначає, як саме буде зламана чи розділена лінія. Після першої ітерації ініціатор перетворюється на генератор, але в наступних кроках генератор застосовується кожному маленькому сегменту фігури.

Окремий випадок опису розмірності подібності фрактальної структури Хаусдорфа для строго самоподібних структур представлено формулою [7, 13]. Вона є результатом узагальнення правил звичайної евклідової геометрії на об'єкти з дробовою структурою та має строгий математичний висновок. В антенній техніці ця залежність дозволяє заздалегідь розрахувати, наскільки сильно знизиться резонансна частота антени при додаванні нових ітерацій фракталу:

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln(1/s)}$$

де:

D – дробова розмірність, яка є мірою складності структури та її здатності заповнювати простір. Чим вище D , тим щільніше провідник "упакований" об'ємом антени;

N – кількість ідентичних копій самого себе, з яких складається фрактал на наступному етапі ітерації;

s – коефіцієнт масштабування (або зменшення). Він показує, у скільки разів кожна нова частина більша / менша за вихідну.

Математично цей підхід був закладений Феліксом Хаусдорфом у 1918 році і пізніше розвинений Бенуа Мандельбротом, який застосував його для опису порізаних природних форм.

Для антен БПЛА, що працюють у нижньому діапазоні частот від 400 до 800 МГц, критично важливе високе значення D , оскільки воно дозволяє "згорнути" довгий провідник (необхідний для роботи на низьких частотах) в компактну структуру, порівнянну з розмірами малих БПЛА [7]. Дослідження показують, що використання самоподібної фрактальної структури кривої Коха [1, 6, 7, 14] 4 ітерації дозволяє скоротити фізичний розмір антени на 68% в порівнянні з класичним диполем [14]. У табл. 1. Наведено основні типи фракталів та їх переваги для БПЛА.

В антенній техніці крива Коха використовується для збільшення електричної довжини випромінювача без істотної зміни його фізичних габаритних розмірів. Це дозволяє створювати компактні антени (монополі, диполі, петлеві антени), що резонують на нижчих частотах у порівнянні з їх класичними аналогами того ж розміру.

Діапазон 400-7000 МГц охоплює ключові частоти керування (433 МГц), навігації (1.2/1.5 ГГц), передачі відео (2.4/5.8 ГГц) та сучасні мережі 5G [15]. Розробка єдиної антени, що покриває цей спектр, вимагає застосування сучасних підходів до проектування антен, які передбачають або поєднання декількох різних фрактальних геометрій в одній структурі або інтеграцію фрактальних елементів з іншими

Таблиця 1

Основні типи фракталів та їх застосування

| Тип фракталу | Розмірність, D | Основна перевага для БПЛА | Типове застосування |
|----------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Крива Коха | 1.2619 | Значна мініатюризація | Малорозмірні FPV-дрони [11] |
| Килим Серпінського | 1.8928 | Багатодіапазонність (LTE, Wi-Fi, 5G) | Мультиспектральна розвідка [6] |
| Фрактал Мінковського | 1.5000 | Управління вхідним опором | Системи широкопasmового зв'язку [17] |
| Крива Гільберта | 2.0000 | Максимальне заповнення простору | Надкомпактні маяки [18] |

радіотехнічними технологіями. Головною проблемою є подолання обмеження класичних фракталів (наприклад, вузька смуга пропускання чи складність узгодження на певних частотах) та досягнення параметрів, недоступних класичним евклідовим антенам [1, 16].

2. Інтеграція фрактальних структур та дефектних структур заземлення (Defective Ground Structures (DGS))

Одним із найбільш значущих досягнень десятиліття стало використання DGS у поєднанні з фрактальними випромінювачами. DGS – це технологія проектування НВЧ-пристроїв, при якій у суцільній площині заземлення (екрані) вирізаються отвори певної форми: від простих геометричних фігур (кола, прямокутники) до складних фрактальних візерунків. Основна ідея полягає у навмисному створенні "дефекту" у мідному шарі заземлення. Це призводить до таких ефектів:

– Зміна розподілу струмів: Вирізи змушують зворотні струми текти довгими і складнішими траєкторіями, що змінює ефективну індуктивність і ємність антени.

– Фільтрація сигналів: DGS поводяться як смугово-загороджувальні фільтри, дозволяючи блокувати певні частоти або пригнічувати небажані гармоніки.

– Розширення смуги пропускання: Використання DGS (наприклад, у вигляді фрактальних вирізів) дозволяє досягти надширокополосності, необхідної для охоплення діапазону 400-7000 МГц.

– Мініатюризація: За рахунок збільшення електричної довжини шляху струму резонансна частота антени знижується, що дозволяє зробити саму антену фізично менше [16, 1, 6, 7].

– Поліпшення характеристик випромінювання: Правильне розташування слотів у заземленні допомагає оптимізувати ДС, посилення та ефективність прийому/передачі сигналу.

– Підвищення ізоляції в системах із кількома антенами (Multiple Input Multiple Output (MIMO)). DGS перешкоджають поширенню поверхневих хвиль, значно знижуючи взаємний вплив (перешкоди) між сусідніми випромінювачами [1].

MIMO – це метод бездротового зв'язку, у якому передачі і прийому даних використовується кілька антен як із боку передавача, і за приймача [18]. У БПЛА використання фрактальних MIMO-решіток (наприклад, конфігурації 2x2 або 4x4) дозволяє досягти компактності при збереженні високої пропускної спроможності, необхідної для трансляції відео високої роздільної здатності та роботи в умовах міських перешкод.

У дослідженнях останнього десятиліття DGS часто комбінують із фрактальними випромінювачами для створення гібридних антен, які одночасно є компактними та працюють у надширокому діапазоні частот [19, 8]. Шляхом вирізування фрактальних візерунків (наприклад, трикутників Серпінського) у площині заземлення інженерам вдалося придушити небажані гармоніки та розширити смугу пропускання [10].

Наприклад, пентагональна фрактальна антена з подвійним кільцем (Double-Pentagonal Fractal Antenna) (DPFA) показала надширокополосність з відносною смугою пропускання 141.5% (від 3.84 до 22.4 ГГц) [20].

DPFA є конструкцією, оптимізованою для компактних пристроїв. Антена складається з основного п'ятикутного випромінювача (патча), усередині якого коаксіально розміщено (або вирізане у вигляді слота) друге п'ятикутне кільце меншого розміру. Структура розміщується на діелектричній підкладці (наприклад, марки FR4) та живиться через мікросмужкову лінію або копланарний хвилевід (CPW). Використання самоподібних вкладених фігур дозволяє антени резонувати на декількох частотах, що масштабуються одночасно. Кожне кільце відповідає за свій сегмент частотного спектру, що в сукупності забезпечує надшироку смугу пропускання (до 141,5% і вище). Фрактальна геометрія дозволяє "упакувати" довгий шлях перебігу струму в обмеженому фізичному просторі. Це забезпечує роботу на низьких частотах за збереження малих габаритів (наприклад, розмір антени може становити всього $0,38 \times 0,52 \lambda_0$, де 0 – частота середини робочого діапазону).

Зазори між зовнішнім та внутрішнім кільцями працюють як розподілені ємності, які разом із індуктивністю фрактальних країв допомагають узгодити вхідний опір антени у всьому робочому діапазоні без громіздких зовнішніх схем. Завдяки такій архітектурі антена здатна перекривати величезний діапазон частот (від С- до К-діапазону, приблизно 3.84-22.4 ГГц) з піковим посиленням до 10.2 дБі.

Аналогічні принципи масштабування та впровадження "Т" - образних слотів під меандровими елементами дозволили оптимізувати антени для роботи в нижчому частотному сегменті 400-7000 МГц [21].

3. Гібридні фрактальні випромінювачі

Для досягнення безперервного покриття діапазону 400-7000 МГц пропонується комбінувати різні типи фракталів. Гібридизація кривих Коха та Мінковського на піввосьмикутно-

му патчі дозволила створити МІМО-антену зі смугою пропускання від 1.0 до 21.4 ГГц. [22]. Основою служить напіввосьмикутний патч, на краї якого нанесені гібридні фрактальні криві Мінковського (з кутом 90°) та Коха (з кутом 60°) [22]. Використовується друга ітерація фракталу для досягнення балансу між мініатюризацією та ефективністю. Для мінімізації втрат часто використовується високочастотний ламінат (наприклад, Rogers RT / duroid 5880) товщиною близько 1.6 мм. Заживлюється патч мікрополосковою лінією, що звужується, яка забезпечує краще узгодження імпедансу в широкому діапазоні частот порівняно зі стандартними лініями. Для зниження взаємного впливу між елементами МІМО-системи площина заземлення модифікується спеціальними шлейфами, що дозволяє досягти ізоляції на рівні від -20 до -50 дБ [22]. Антена здатна перекривати безперервний діапазон від 1.0 до 21.4 ГГц (відносна смуга пропускання близько 182%). Завдяки фрактальній структурі та модифікованому заземленню забезпечується висока ізоляція між портами (від -20 до -50 дБ), що критично для систем зв'язку БПЛА, які працюють в умовах інтенсивних перешкод [22], а також високий коефіцієнт посилення ($DG > 9.99$ дБ). Використання напіввосьмикутної форми у поєднанні з фракталами дозволяє суттєво зменшити площу антенної решітки (наприклад, до 45 x 75 мм для системи 2 x 2). У табл. 2. наведені параметри широкосмугових фрактальних систем, розроблених для інтеграції до платформ БПЛА.

Для БПЛА критично важливо не тільки приймати сигнал, а й керувати напрямом випромінювання підвищення рівня радіомаскування і мінімізації енерговитрат [8].

Використання активних компонентів, таких як PIN-діоди та варикапи, інтегрованих безпосередньо у фрактальну структуру антени, дозволяє динамічно змінювати розподіл струмів [8]. Це дає можливість перемикаєти робочі частоти та змінювати форму ДС. Наприклад, гнучка антена на підкладці з поліімиду (PI) товщиною 0.05 мм може працювати у трьох режимах: дводіапазонному (2.4/5.8 ГГц), од-

Таблиця 2

Широкопasmові фрактальні системи для антен БПЛА

| Геометрія антени | Діапазон частот (ГГц) | Коефіцієнт посилення (дБі) | Застосування в БПЛА |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Sinuous + Meander Fractal | 0.51 – 10.72 | -3.5 – 8.2 | Пеленгація та РЕБ [17] |
| Moore-Koch Hybrid | 3.5 - 19.78 (7 резонансів) | 1.98 – 4.23 | Багатоцільовий зв'язок 5G/ Ku [15] |
| Koch Snowflake + Sierpinski | 2.11 – 9.56 | 3.92 – 19.38 | Високошвидкісна телеметрія [12] |
| Ізольований трикутний фрактал | 4.2 – 6.4 | До 4.38 | Збір енергії (Energy Harvesting) [23] |

нодіапазонному та режимі безперервної перебудови [8].

Така гнучкість дозволяє БПЛА адаптуватися до електромагнітної обстановки, що змінюється, переключаючись на вільні канали зв'язку в режимі реального часу. Крім того, конформне розміщення антени на крилі дрону вирішує проблему аеродинамічного опору, яка особливо гостро стоїть для малих безпілотників. [8].

4. Фазовані антенні решітки на основі фракталів

Фрактальні антенні решітки забезпечують переваги у вигляді зниження рівня бічних пелюсток ДС та зменшення кількості елементів у порівнянні з традиційними ґратами при збереженні тієї ж спрямованості [24]. Дослідження 2022 – 2025 років зосереджені на використанні розріджених фрактальних ґрат для створення систем інтелектуального формування електро-

магнітного променя [16]. При використанні рою БПЛА такі антени дозволяють підтримувати стабільні зв'язки між апаратами навіть за їх хаотичного руху, використовуючи алгоритми адаптивного управління ДС [24]. Застосування фрактальних елементів знижує взаємний вплив між антенами у ґратках, що спрощує проектування систем МІМО для високошвидкісної передачі відеоданих [22].

5. Конформні та гнучкі антени

Для аерокосмічних систем критичним фактором є вага. Перехід на гнучкі друковані схеми (FPC) дозволив створювати антени, які можуть бути вбудовані безпосередньо в обшивку БПЛА або ракет [8]. Використання таких матеріалів, як Rogers RT/ duroid 5880 і Karton забезпечує стабільність характеристик в умовах екстремальних температур і вібрацій [8] табл. 3.

Таблиця 3

Гнучкі діелектрики

| Властивість матеріалу | FR4 (стандарт) | Rogers RT/ duroid 5880 | Поліімід (PI) |
|--------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| Діелектрична проникність | 4.3 – 4.7 | 2.2 | 3.5 |
| Тангенс кута втрат | 0.019 – 0.025 | 0.0009 | 0.008 |
| Гнучкість | Низька | Середня | Висока [8] |
| Вага | Висока | Середня | Мінімальна [9] |

6. Спеціалізовані рішення для РЕБ та скритності

Одним з найбільш яскравих прикладів практичного застосування фрактальних технологій є антена FeathR, розроблена для придушення роїв дронів. [19]. Завдяки фрактальній структурі, оптимізованій за допомогою штучного інтелекту, антена має надшироку смугу пропускання при мінімальній помітності для радарів. Її малий розмір дозволяє розміщувати потужні передавачі завад на борту малих дронів, які можуть влітати всередину ворожого рою і пригнічувати зв'язок зсередини, не створюючи завад власним системам навігації.

Для комерційного сектора та державних структур стали доступні антени серії UAVee (наприклад, UAVee 4160), що забезпечують всеспрямоване покриття від 400 до 16 ГГц МГц, що робить їх ідеальними для інтеграції в наземні станції управління і бортові ретранслятори [5].

7. Теоретичні обмеження чисельного моделювання і методи оптимізації

Незважаючи на очевидні переваги, фрактальні антени стикаються із низкою викликів. Складність геометрії потребує прецизійних методів виготовлення, таких як лазерне пряме структурування (LDS) або аерозольний друк [21]. З іншого боку, зі збільшенням кількості ітерацій фрактала ефект мініатюризації уповільнюється, а втрати у провіднику зростають через збільшення електричної довжини [13].

Ефективне проектування антен для діапазону 400–7000 МГц сьогодні неможливе без використання передових електромагнітних симуляторів, таких як CST Microwave Studio та HFSS, що застосовують методи кінцевих елементів (FEM) та інтегральних рівнянь (MoM) [6]. У 2024–2025 роках намітився тренд використання машинного навчання для оптимізації фрактальних параметрів. Створені алгоритми дозволяють прогнозувати S-параметри та форму ДС, скорочуючи час розробки прототипу з місяців до тижнів [19]. S-параметри (параметри розсіювання) - це коефіцієнти, що харак-

теризують поведінку високочастотних пристроїв (включаючи антени) через опис того, як електромагнітні хвилі відбиваються від портів системи та поширюються між ними.

У контексті проектування антен ключове значення мають такі параметри: S_{11} (коефіцієнт відображення): визначає ступінь узгодження антени з лінією живлення. Значення S_{11} нижче -10 дБ вважається стандартним показником хорошого імпедансного узгодження, у якому антена ефективно випромінює енергію.

S_{21} , S_{12} (ізоляція): у багатоантенних системах МІМО ці параметри описують коефіцієнт зв'язку між портами. Для стабільної роботи зв'язку на БПЛА та мінімізації перешкод прагнуть досягти високого рівня ізоляції – зазвичай у діапазоні від -20 дБ до -50 дБ. Аналіз S-параметрів дозволяє оптимізувати геометрію фрактальних антен для роботи в надшироких діапазонах частот (наприклад від 400 до 7000 МГц), забезпечуючи стабільний резонанс і високу ефективність випромінювання.

Висновок

Аналіз досягнень у галузі розробки електромагнітних перетворювачів, зокрема, антен для БПЛА, що базуються на застосуванні методів фрактальної електродинаміки показує, що дана технологія є визначальною для наступного покоління систем зв'язку та управління БПЛА. Використання цих методів дозволяє успішно розв'язати проблеми мініатюризації антен і розширити діапазон робочих частот від 400 МГц до 16 ГГц. Ключові інновації, такі як інтеграція DGS, використання гнучких конформних підкладок та впровадження активних елементів для перебудови ДС забезпечують перетворення антени з пасивного компонента на адаптивну інтелектуальну систему.

Список використаної літератури

[1]. JEM Engineering Company (Blog). Fractal Antennas, Explained - JEM Engineering <https://jemengineering.com/blog-fractal-antennas-explained/>

- [2]. Benjamin Barnes, Othman Suleiman, JeanPaul Badjo, Kausik S Das. Fractal-based electrolytic capacitor electrodes: Scaling behavior with respect to fractal order and complexity // arXiv preprint arXiv:1810.00221. – 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.00221>
- [3]. Nedić J., Vassilicos J. C. Vortex shedding and aerodynamic performance of airfoil with multiscale trailing-edge modifications // *AIAA Journal*. – 2015. – Vol. 53. – No. 11. – pp. 3240–3250. <https://doi.org/10.2514/1.J053834>
- [4]. Li J. et al. Study on the Complex Band Structure and Auxetic Behavior of Fractal Re-Entrant Honeycomb Metamaterials // *Materials*. – 2025. – Vol. 18. – No. 24. – pp. 5695. <https://doi.org/10.3390/ma18245695>
- [5]. Fractal Antenna Systems, Inc. Products Catalog: Symphony-SP, UAVEe, UACM series. Fractenna Official Website. 2025. <https://www.fractenna.com/product/all.html>
- [6]. Khurana S., Rajni Kumar, Y. Emerging Perspectives on Multiband Fractal and Hybrid Fractal Antennas for Wireless Applications: A Comprehensive Analysis // *Advances in Systems Science and Applications*, Vol. 25, No. 1. pp. 23–51. (2025). <https://ijassa.ipu.ru/index.php/ijassa/article/download/1686/30>
- [7]. Jena M. R., Mishra G. P., Sahoo A. B., Mangaraj B. B. Fractal Geometry and Its Application to Antenna Designs // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Vol. 9, No. 1. 3726–3743, (2019). <https://doi.org/10.35940/ijeat.A9793.109119>
- [8]. Teng Bao, Mingmin Zhu¹, Zhifeng He, Yi Zhang, Guoliang Yu, Yang Qiu¹, Jiawei Wang, Yan Li, Haibin Zhu and Hao-Miao Zhou. Design of Tri-Mode Frequency Reconfigurable UAV Conformal Antenna Based on Frequency Selection Network // *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 15(3), 51 (2025), <https://doi.org/10.3390/jlpea15030051>
- [9]. Market Glass, Inc. FPC in Aerospace and Defense Market – Global Strategic Business Report. March 2026, ID: 6093731 <https://www.researchandmarkets.com/reports/6093731/fpc-in-aerospace-defense-market-global>
- [10]. Naik V. M., Rao A. P. Design and Analysis of Fractal Antenna Geometry for Wideband Applications // *Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE 2023)*, pp. 836–844, (2023). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1_84
- [11]. Behera S. K., K. Patel. Design of Koch Curve-Based Fractal Antenna for Ultra-Wideband Applications // *IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, pp. 1–5, (2023). http://dspacspace.nitrkl.ac.in/dspacspace/bitstream/2080/4153/1/2023_MAPCON_SKBehera_Design2.pdf
- [12]. Azzouz A., Bouhmidi R., Munir M. E., Nasralla M. M., Chetoui M. Characterization and Analysis of Hybrid Fractal Antennas for Multi-band Communication and Radar Applications // *Fractal and Fractional (MDPI)*, Vol. 10, No. 1. Art. No. 47. (2026). <https://doi.org/10.3390/fractalfract10010047>
- [13]. Vinoy K. J. Fractal Shaped Antenna Elements for Wide-and Multi-band Wireless Applications // The Pennsylvania State University. The Graduate School. College of Engineering. A Thesis in Engineering Science and Mechanics. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, August 2002. <https://scispace.com/pdf/fractal-shaped-antenna-elements-for-wide-and-multi-band-luw9bbewqe.pdf>
- [14]. MathWorks Team. Multiband Nature and Miniaturization of Fractal Antennas. MATLAB & Simulink Documentation. (2024). <https://ww2.mathworks.cn/help/antenna/ug/multiband-nature-and-miniaturization-of-fractal-antennas.html>
- [15]. Rishi Parasher, Dinesh Yadav, Ankur Saharia. Design and analysis of hybrid fractal frequency-band reconfigurable metamaterial antenna for multi-standard wireless applications // *Results in Engineering*, Vol. 26, 104696, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104696>
- [16]. Hakmin Lee, Ye-Bon Kim, Han Lim Lee. Reconfigurable Antenna for UAV-Assisted Wide Coverage Air-to-Ground Communications // *IEEE Access*, Vol: 10, 88034 - 88042 (2022). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199700>

- [17]. Junghyeon Kim, Jongho Keun, Taehoon Yoo and Sungjoon Lim. Miniaturization and Bandwidth Enhancement of Fractal-Structured Two-Arm Sinuous Antenna Using Gap Loading with Meandering // *Fractal and Fractional* (MDPI), Vol. 7, No. 12, 841, (2023). <https://doi.org/10.3390/fractalfract7120841>
- [18]. Jaume Anguera, Aurora Andújar, Je-evani Jayasinghe, et al. Fractal Antennas: An Historical Perspective // *Fractal and Fractional* (MDPI), Vol. 4, No. 1. Art. No. 3, (2020). <https://doi.org/10.3390/fractalfract4010003>
- [19]. Fractal Antenna Systems Develops Miniaturized Wideband Antenna to Jam Swarms of Drones // *Everything RF News*. (2025). <https://www.everythingrf.com/news/details/19915-fractal-antenna-systems-develops-miniaturized-wideband-antenna-to-jam-swarms-of-drones>
- [20]. Kim J., Jang T., Lim S. Ultra-Wideband Double-Pentagonal Fractal Antenna for C-, X-, Ku- and K-Band Wireless Applications // *Micromachines* 16 (11), 1237, (2025). <https://doi.org/10.3390/mi16111237>
- [21]. Norun Abdul Malek, Nur Hamizah Muhamad Mokhtar, Khamis Ali, Farah Mohd Isa. Design of Small Antennas for 400 MHz Applications // *Conference: 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, September 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2018.8539246>
- [22]. Sidhu A. K., Sivia J. S. Design of Wideband Fractal MIMO Antenna using Minkowski and Koch Hybrid Curves on Half Octagonal Radiating Patch with High Isolation and Gain for 5G Applications // *Advanced Electromagnetics*, Vol. 12, No. 1. pp. 58–69, (2023). <https://doi.org/10.7716/aem.v12i1.1982>
- [23]. Mohamed Guermal, Jamal Zbitou, Ridouane Er-Rebyiy, Fouad Aytouna, Aziz Oukaira, Otman Oulhaj. A New Design of a Wideband Fractal Antenna for RF Energy Harvesting Applications at 5.8 GHz // *EPJ Web Conferences*, Vol. 326, 01001, (2025). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202532601001>
- [24]. Mandal P., Kashyap C. S., Roy L. P., Das S. K. Reconfigurable Radar Antenna Design for UAV Application // *In 2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT) IEEE Xplore*, pp. 1-6, (2023, January). <https://doi.org/10.1109/ICONAT57137.2023.10080058>

Стаття надійшла до редакції: 06.03.2026

прийнята до друку: 23.03.2026

опублікована: 20.04.2026

PASC 84.40.Ba

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355910>

METHODS OF FRACTAL ELECTRODYNAMICS FOR EFFICIENCY ENHANCEMENT AND MINIATURIZATION OF RADIATORS (REVIEW)

Ya. I. Lepikh, A. O. Karpenko, A. P. Balaban

Research Institute of Physics of Odesa I. I. Mechnikov National University

2 Vsevoloda Zmiienka St, Odesa, 65082, Ukraine

e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Abstract. This paper analyzes the development of fractal methods in electrodynamics for the improvement of transducers, primarily using antennas as an example, with a focus on their integration into unmanned aerial vehicles (UAVs). The key challenge in designing such antennas lies in the contradiction between the requirements for ultra-wideband operation (400–7000 MHz) and strict

constraints on mass, dimensions, and aerodynamic characteristics, which traditional geometric parameters cannot satisfy.

Hybrid approaches combining the Koch, Sierpinski, and Minkowski geometries are analyzed, as well as methods for extending the passband through the use of defective ground structures (DGS) and metamaterials.

Specialized designs, such as FeathR™, optimized for electronic warfare tasks while maintaining low radar visibility, have been identified. The solutions presented in this review confirm the possibility of effective continuous coverage of the frequency spectrum from 400 MHz to 7 GHz and above.

Keywords: fractal methods, beam pattern control, antenna miniaturization, defective grounding structures