

ПОЛІТАНСЬКИЙ РУСЛАН

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0003-0015-7123>e-mail: [r.politansky@chnu.edu.ua](mailto:r.politansky@chnu.edu.ua)

ПЛОЩИК АННА

Національна академія Державної прикордонної служби України

імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0002-7034-1930>e-mail: [ploschik.a@gmail.com](mailto:ploschik.a@gmail.com)

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВИХ АНТЕННИХ ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ Wi-Fi, 5G ТА МЕРЕЖАХ IoT

У роботі проведено аналіз та порівняння параметрів і характеристик вузькосмугових та широкосмугових антен, що використовуються в технологіях IoT. У сучасних бездротових системах зв'язку, таких як Wi-Fi, 5G та мережах Інтернету речей критично важливо забезпечити високу якість сигналу та ефективно використання частотного ресурсу. Для пристроїв Інтернету речей, коли критичними показниками стають невеликі габарити та споживана потужність, досить часто у якості антенних пристроїв обирають широкосмугові антени. Значний науковий інтерес та великий обсяг інженерних досліджень таких антен пов'язаний із можливістю розробки спеціалізованих протоколів передачі інформації, які забезпечують ефективне використання частотного ресурсу в умовах значної інтерференції, створеної сусідніми пристроями. Антени у таких системах є критичними компонентами. Одним з основних засобів визначення, оптимізації і моделювання широкосмугових антенних пристроїв є HFSS (High-Frequency Structure Simulator). HFSS є потужним інструментом для моделювання та аналізу, що дозволяє отримати точні результати та здійснити детальний параметричний аналіз та оптимізацію антен за розрахованими параметрами. Використовуючи для цього найбільш значущі досягнення сучасних обчислювальних методів у різних галузях науки і техніки та електродинаміці зокрема: метод моментів, генетичні алгоритми оптимізації тощо. У цій статті розглянуто використання HFSS для аналізу та порівнювання параметрів і характеристик вузькосмугових та широкосмугових антен, що застосовуються у технологіях IoT: діаграму направленості, коефіцієнт відбивання антени, частотну діаграму випромінювання та ряд інших. Для цього розглянуті пристрої, які представляють обидві категорії: мікросмугова кругова антена та логперіодична трапецієподібна антена. На основі проведеного аналізу зроблений висновок про можливість формування багатоканальної системи на основі широкосмугової антени та проведено його порівняння із каналом, утвореним вузькосмуговою антеною.

Ключові слова: широкосмугова антена, широкосмуговий сигнал, HFSS, IoT, багатоканальна система

POLITANSKY RYSLAN

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

PLOSHCHYK ANNA

The Bohdan Khmelnytskyi National Academy

## MODELING AND ANALYSIS OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF BROADBAND ANTENNA DEVICES IN WI-FI, 5G COMMUNICATION SYSTEMS, AND IOT NETWORKS

In modern wireless communication systems, such as Wi-Fi, 5G, and Internet of Things (IoT) networks, ensuring high signal quality and efficient use of frequency resources is critically important. With the rapid proliferation of IoT devices, characterized by small size and low power consumption, the choice of antenna plays a pivotal role. Broadband antennas are frequently selected for IoT applications because of their ability to operate over a wide frequency range, which is essential for maintaining stable communication in environments with significant interference. The growing demand for efficient and reliable wireless networks, coupled with the challenges posed by interference and limited spectrum availability, has made the design and optimization of broadband antennas a focal point for researchers. Broadband antennas are essential components for IoT systems as they contribute to the effective use of the frequency spectrum, especially in environments with high interference from neighbouring devices. The ability of these antennas to maintain consistent performance across a broad range of frequencies makes them ideal for modern communication systems. This flexibility allows them to support a greater number of channels, thus improving the overall system capacity. The development of specialized data transmission protocols tailored to broadband antennas helps optimize frequency utilization and mitigate the effects of interference, which is crucial in crowded spectrum environments like IoT networks. One of the primary tools for modelling, analysing, and optimizing broadband antenna devices is the High-Frequency Structure Simulator (HFSS). HFSS is a powerful simulation tool that enables to perform detailed parameter analyses and optimize antenna designs for specific applications. By employing advanced computational methods such as the Method of Moments (MoM), Finite Element Method (FEM), and genetic algorithms for optimization, HFSS provides highly accurate results that are critical for the design and deployment of effective antenna systems. These computational methods allow to simulate various aspects of antenna performance, such as radiation patterns, return loss, frequency response, and other key parameters, which are necessary for ensuring reliable communication in modern wireless systems. The article covers modern methods of analysing the parameters and characteristics of antenna devices: S-parameters, radiation patterns, and frequency response. For this purpose, representatives of two broad categories of antenna devices are considered: narrowband (microwave circular antenna) and broadband (trapezoidal log-periodic antenna), which are used in modern communication technologies such as Wi-Fi, 6/6E and 5G. This provides a new level of understanding of the relationship between antenna design and communication quality in high-frequency bands. Specifically, the study focuses on two antenna types: a microstrip circular antenna representing narrowband technology and a log-periodic trapezoidal antenna representing broadband designs. These antennas were selected to represent the distinct categories of narrowband and broadband solutions, allowing for a comprehensive comparison of their performance in real-world conditions. The results of the analysis reveal that broadband antennas outperform their narrowband counterparts in systems where a high density of devices operates simultaneously. Broadband antennas, with their ability to handle wider frequency ranges and resist interference more effectively, enable the formation of multi-channel systems that can significantly increase the capacity and efficiency of wireless communication

networks. Moreover, the use of broadband antennas allows for greater flexibility in spectrum management, reducing the strain of available frequencies and improving overall network performance. The findings of the study highlight the potential of broadband antennas in modern communication systems, such as Wi-Fi, 5G, and IoT. The combination of broadband antenna systems with advanced simulation and optimization techniques, presents new opportunities for the development of high-performance wireless networks capable of supporting the growing demands of IoT and other data-intensive applications. The study's detailed modelling and analysis provide valuable insights for looking to enhance antenna performance and ensure reliable, high-quality communication in challenging environments. In conclusion, the article demonstrates that broadband antennas, offer significant advantages in terms of frequency efficiency, interference resistance, and network capacity. These antennas are well-suited for use in modern wireless communication systems, where the need for robust and efficient signal transmission is paramount.

Keywords: broadband antenna, broadband signal, HFSS, IoT, multi-channel system

### Постановка проблеми

З огляду на важливість антен у сучасних системах зв'язку, метою даної роботи є дослідження різних типів антен, їх класифікація та аналіз характеристик, що впливають на ефективність бездротового зв'язку. Зокрема, необхідно детально вивчити вузькосмугові та широкосмугові антени, оцінити їх оптимізацію для роботи в заданих частотних діапазонах, а також визначити сфери застосування в залежності від специфічних вимог. Особливу увагу слід приділити характеристикам випромінювання, які дозволяють розуміти механізми передачі та прийому електромагнітних хвиль, а також впливу на якість зв'язку в умовах різних частот і відстаней. Результати дослідження можуть бути корисними для подальшої оптимізації антенних систем у супутниковому зв'язку, радіоастрономії, пристроях IoT та інших сферах, де потрібна висока якість передачі інформації [1].

### Аналіз останніх джерел

Широкасмугові антенні пристрої досить широко представлені в літературних джерелах, які присвячені розробленню систем передачі інформації за технологією IoT [2, 3, 4]. Це пов'язано із тим, що такі антени здатні працювати в більш широкому діапазоні частот, забезпечуючи покращення показника SNR, що робить їх незамінними у системах із великою кількістю абонентів, між якими виникають значні інтерференційні завади, а також в умовах багатопробного поширення сигналів, зокрема, якщо немає шляху поширення, утвореного каналом прямої видимості. Розвиток сучасної елементної бази, зокрема SMD-компонентів, забезпечує можливість мініатюризації та автономного живлення антенних пристроїв, що робить їх особливо привабливими для технології IoT [5]. Цікавим є те, що для забезпечення двоканальних систем передачі для пристроїв IoT використовують також звичайні монопольні антени із багатопортовим підведенням сигналу [6].

Враховуючи можливість програмного імітаційного моделювання HFSS, його використовують для процесів аналізу і оптимізації електромагнітних полів в складних високочастотних системах, таких як антени, хвилеводи та резонатори. Це дозволяє детально оцінити вплив різних параметрів конструкції на характеристики системи та здійснити їхнє налаштування для досягнення оптимальної продуктивності [7]. Поширеність і ефективність цього високоякісного програмного продукту забезпечує використання сучасних досягнень у галузі обчислювальної математики для розв'язування інтегро-диференціальних рівнянь (методи моментів, кінцевих різниць, Бубнова-Гальоркіна тощо) [8] та методів багатопараметричного аналізу і оптимізації (квазіньютонівський алгоритм, генетичні алгоритми тощо).

В роботі [9] наведено дані про важливу роль широкосмугових антен у бездротових системах зв'язку, таких як Wi-Fi, 5G та мережі Інтернету речей (IoT). Кожен з цих типів систем використовує специфічні антени з унікальними характеристиками, що відповідають їх вимогам до частоти, площі покриття та потужності сигналу. Wi-Fi та 5G представляють два різних підходи до бездротового зв'язку, які відрізняються як технологічними характеристиками, так і призначенням. Wi-Fi зазвичай використовується для забезпечення високошвидкісного з'єднання в межах обмежених просторів, таких як домогосподарства чи офіси, функціонуючи на частотах 2.4 GHz і 5 GHz через локальні точки доступу. Натомість 5G є наступним поколінням мобільних мереж, що забезпечує набагато вищі швидкості передачі даних, низьку затримку та високий рівень підключення у великих масштабах завдяки використанню нових частотних діапазонів, включаючи міліметрові хвилі (mmWave). Це дозволяє 5G підтримувати широкий спектр застосувань — від звичайного мобільного зв'язку до інтеграції з Інтернетом речей (IoT) і автономними транспортними засобами, тоді як Wi-Fi залишається оптимальним для локальних мереж

### Виклад основного матеріалу

S-параметри, або параметри розсіювання (від англ. Scattering Parameters), є фундаментальною концепцією в області радіочастотної інженерії та використовуються для характеристики лінійних електричних мереж, особливо в контексті антен та систем високих частот. Вони описують, як радіочастотні сигнали відбиваються та передаються через систему.

У випадку високочастотних сигналів вимірювання струмів і напруг є досить складною задачею. Замість цього вимірюють параметри високочастотного випромінювання, яке обов'язково є присутнім у таких пристроях. Для цього використовують прилад, який називають векторний аналізатор [10]. Основуючись на показах приладів [11], можна перейти до електричних параметрів високочастотних схем, використовуючи для цього поняття хвильового опору середовища, яке пов'язує між собою напруженість електричного і магнітного поля (які показує аналізатор) за співвідношенням, аналогічним закону Ома.

В результаті утворюється система з  $n$  лінійних рівнянь [12]:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2 \\ b_2 &= S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2, \end{aligned} \quad (1)$$

або у матричному вигляді:

$$b = S \cdot a \quad (2)$$

де  $a_i$  є незалежними змінними,  $b_i$  є залежними змінними (вхідні та вихідні сигнали порта  $i$  відповідно).

Фізичний сенс S-параметрів визначається наступним чином:

S11 - це вхідний коефіцієнт відбиття у мережі з виходом, що закінчується узгодженим навантаженням ( $a_2 = 0$ );

S21 — це пряма передача сигналу;

S12 — зворотна передача сигналу;

S22 — вихідний коефіцієнт відбиття.

Для вимірювання S-параметрів n-портової системи всі n портів повинні бути з'єднані узгодженим навантаженням (не обов'язково однаковим значенням для всіх портів), включаючи порт, підключений до генератора (узгоджений генератор). Для найпростішої двопортової системи узгоджене навантаження має імпеданс, комплексно спряжений із імпедансом генератора, але для високочастотних систем використання S-параметрів є більш зручним, і набуває все більшого застосування внаслідок значного випромінювання у близькій зоні антени. Тому S-параметри визначають характеристики досліджуваного радіочастотного пристрою, від яких залежить його узгодженість із генераторами сигналів, а отже, і коефіцієнт корисної дії.

У статті представлені нові підходи до аналізу S-параметрів з використанням програмного забезпечення HFSS. Це дозволяє не тільки визначати коефіцієнт корисної дії та його частотну залежність, але й досліджувати поведінку антенних систем у складних умовах багатопроменевого поширення сигналів високочастотних діапазонів, та підвищити точність моделювання електромагнітних полів. Цьому сприяє інформація про амплітуду та фазу відбитих та переданих сигналів у досліджуваній системі, оскільки програма дає оперує як скалярними величинами, так і комплексними (векторними) величинами. Такими є зворотні втрати (скалярна величина) та імпеданс (векторна величина).

Основним оптимізаційним параметром системи є частота пристрою або схеми, що оцінюється.

S11-параметр допомагає визначити частотний діапазон, у якому антена прогнозовано має високий коефіцієнт корисної дії, що обумовлений мінімальними втратами енергії на відбиття (низькі значення параметру).

S21 використовується для оцінки втрат при передачі сигналу через антенну систему, що важливо для оптимізації ефективності приймання сигналу [8].

Частотні характеристики антен (коефіцієнт втрат та діаграма випромінювання) відіграють важливу роль у зв'язку із переходом до більш високих робочих частот та збільшенням ширини смуги частотного каналу, яку використовують антени. У зв'язку із цим виникає додаткова класифікаційна ознака антен – вузькосмугові та широкосмугові антени.

Для порівняння характеристик вузькосмугових та широкосмугових антен проведені дослідження властивостей patch-антени (вузькосмугової) та логоперіодичної (широкосмугової) антен. На рис. 1а зображена конструкція та приводяться значення геометричних розмірів patch-антени, яка використовується для забезпечення зв'язку у WiFi-мережах. Для дослідження властивостей широкосмугових антен була використана логоперіодична антена (LPDA). Антени цього типу використовують у комунікаціях та радіомовленні завдяки їх здатності працювати в широкому частотному діапазоні. Конструкція та параметри антени приводяться на рис. 1б.

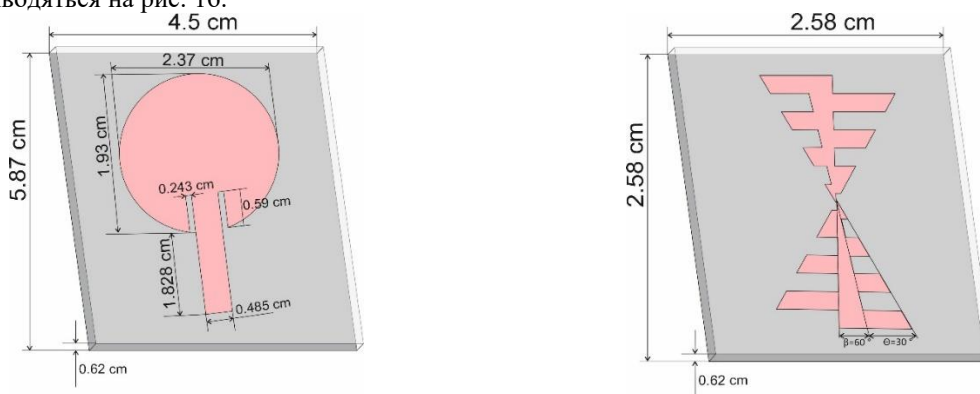


Рис.1. Конструкція та параметри вузькосмугової: а) – patch-антени із робочою частотою 5 ГГц, б) – LPDA-антени із частотним діапазоном 4.5-11.2 ГГц

Типи антен, що використовуються у Wi-Fi, 5G та технологіях IoT, можуть бути як широкосмуговими, так і вузькосмуговими, залежно від їхньої специфікації та призначення.

Вузькосмугові антени оптимізовані для роботи на обмеженому діапазоні частот. Вони забезпечують високу ефективність передачі та прийому сигналів у заданій частотній смузі, але не підходять для використання в умовах, де потрібна робота на різних частотах.

Досліджена Wi-Fi антена (рис. 1a) має робочу частоту 5 ГГц, і є вузькосмуговою із резонансом на цій частоті. Про це можна зробити висновок із аналізу частотної залежності параметра S11, яка зображена на рис. 2.

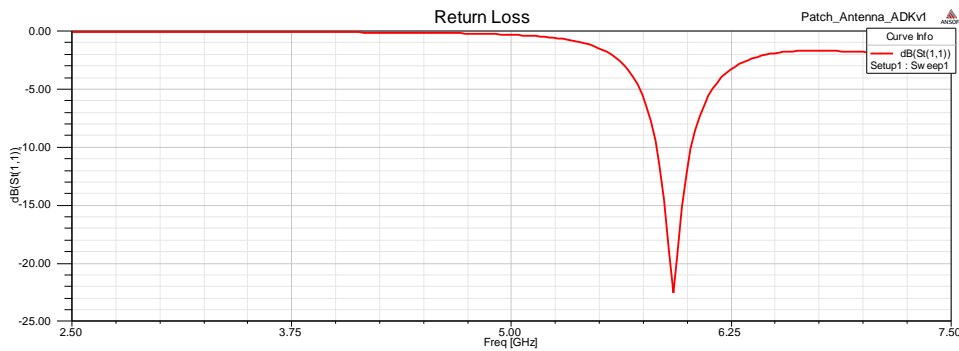


Рис. 2. Частотна залежність коефіцієнту відбивання patch-антени (коефіцієнту матриці розсіювання S11)

Як видно із графіка на рис. 2, антена має один канал на частоті 5 ГГц, півширина цього каналу становить 0,2 ГГц, а його рівень має значення сигнал/шум -11 дБ.

Іншою дослідженою характеристикою є діаграма направленості цієї антени. Три-вимірна діаграма цієї характеристики приведена на рис. 3.



Рис. 3. Три-вимірна діаграма направленості patch-антени

Отже, можна зробити висновок, що випромінювання цієї антени не залежить від азимутного кута (Phi). Більш детальні характеристики направленості можна одержати використовуючи діаграми для двох граничних значень азимутного кута: Phi1=0° (червоний колір), і Phi2=90° (ліловий колір). Відповідні графічні залежності приводяться на рис. 4.

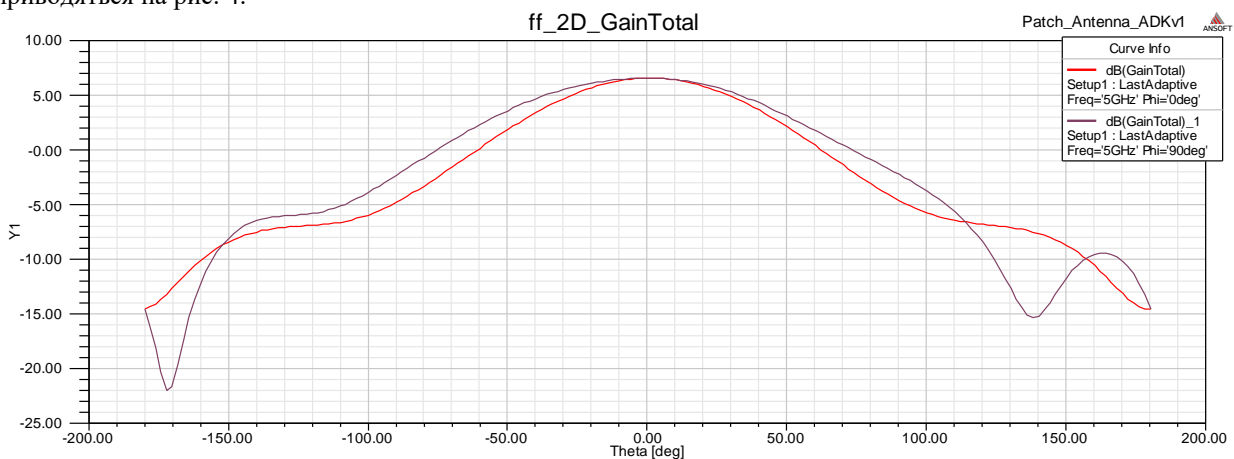


Рис. 4. Коефіцієнт підсилення вузькосмугової patch-антени для двох значень азимутного кута: Phi1=0° (червоний колір), і Phi2=90° (ліловий колір)

Виходячи із даних, що приведені на рис. 4, можна зробити висновок, що максимальний коефіцієнт підсилення цієї антени становить дорівнює 5 дБ для  $\theta = 0^\circ$ , далі він рівномірно спадає до 0 дБ у діапазонах кутів  $(-75^\circ; 0^\circ)$  та  $(0^\circ; 75^\circ)$ , далі до -5 дБ у діапазонах  $(-110^\circ; -75^\circ)$  та  $(75^\circ; 110^\circ)$

При цьому коефіцієнт підсилення практично не залежить від азимутного кута. Таким чином, можна зробити висновок про те, що досліджена patch-антена має широкий діапазон кутів випромінювання, і одна антена може забезпечити покриття значної площі.

Ширококутові антени здатні працювати в широкому діапазоні частот. Вони мають більш плоску амплітудно-частотну характеристику, що дозволяє їм ефективно передавати та приймати сигнали на багатьох частотах.

Про це можна зробити висновок із аналізу частотної залежності параметра S11, який зображено на рис. 5.

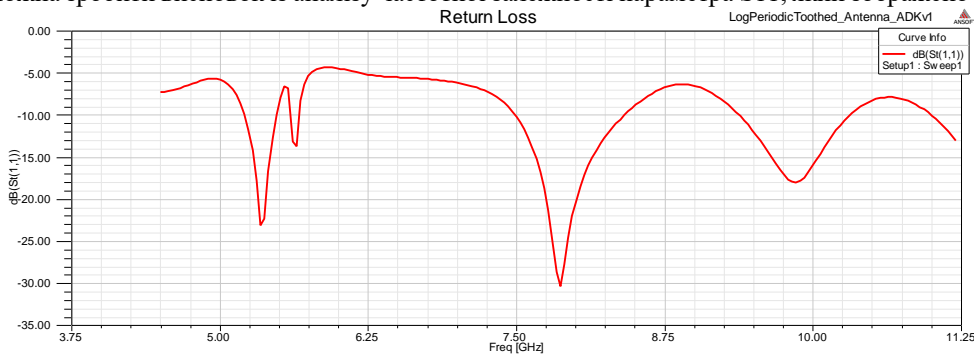


Рис. 5. Частотна залежність коефіцієнту відбивання LPDA-антени (коефіцієнту матриці розсіювання S11)

Виходячи із аналізу частотної залежності коефіцієнту відбивання, можна зробити висновок про наявність одразу трьох частотних каналів на рівні -15 дБ із частотами 5.3 ГГц, 7.9 ГГц та 9.88 ГГц із шириною каналів 0.12 ГГц, 0.37 ГГц та 0.28 ГГц відповідно. Якщо використовувати сигнали у вказаних частотних діапазонах, то можна забезпечити високий коефіцієнт корисної дії цієї антени.

Далі розглянемо характеристику направленості LPDA-антени, об'ємна діаграма якої приведена на рис. 6.

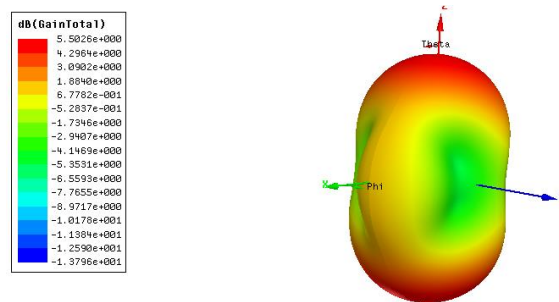


Рис. 6. Об'ємна діаграма направленості LPDA-антени

З аналізу діаграми направленості LPDA-антени можна зробити висновок, що даний тип антен здатний забезпечувати стабільне покриття у широкому діапазоні азимутних кутів. Більш детальні кількісні характеристики напрямленості приводяться у вигляді залежності коефіцієнту підсилення антени для двох значень азимутного кута:  $\Phi_1=0^\circ$  (червоний колір), і  $\Phi_2=90^\circ$  (ліловий колір), що зображені на рис. 7.

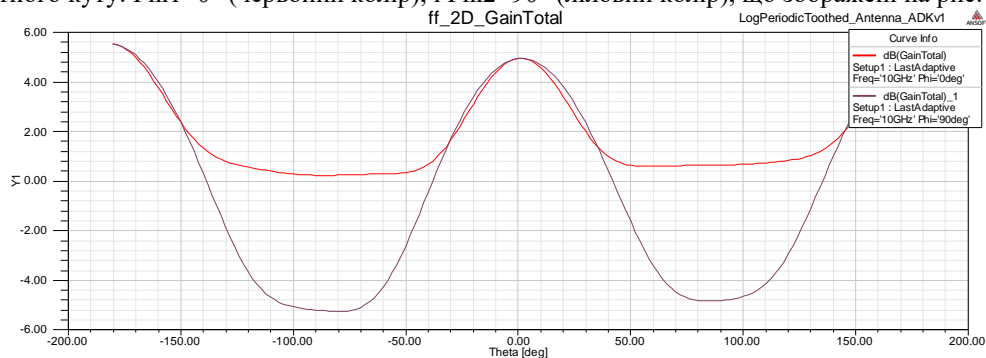


Рис. 7. Діаграми направленості ширококутової LPDA-антени для двох значень азимутного кута:  $\Phi_1=0^\circ$  (червоний колір), і  $\Phi_2=90^\circ$  (ліловий колір)

Аналіз графічних залежностей, представлених на рис. 7, продемонстрував зміну коефіцієнту підсилення антени в залежності від азимутного кута. Максимальне підсилення антени становить 5 дБ, і воно лінійно спадає до 1 дБ у діапазоні кутів сходження ( $-30^\circ; 0^\circ$ ) і ( $0^\circ; 30^\circ$ ), у цьому діапазоні немає залежності від азимутного кута. Подальше збільшення кута сходження призводить до виникнення значної залежності від азимутного кута, а коефіцієнт підсилення антени зменшується від 0 дБ для кута  $\Phi_1=0^\circ$  (червона лінія) до -5.5 дБ для кута  $\Phi_2=90^\circ$  (лілова лінія).

Із цього можна зробити висновок, що дана антена є вузьконапрямленою, а її використання обмежується фіксованою геометрією розміщення «передавач/приймач».

Але при цьому вона може працювати в умовах значної кількості абонентів, оскільки ширококутові сигнали мають кращу завадостійкість порівняно із вузькокутовими. Це робить LPDA-антену придатною для



використання в умовах indoor (всередині приміщення), де зв'язок для багатьох підключених абонентів забезпечують декілька таких антен, щоб забезпечити рівномірне покриття у всьому приміщенні.

Проте, при цьому виникає необхідність дослідження та розроблення методів та апаратних засобів передавання даних, які використовують широку частотну смугу. За умови застосування таких методів, що використовують ширококутові сигнали, логоперіодична антена може ефективно працювати на різних частотах без необхідності переналаштування, що робить її універсальним рішенням для використання в умовах, де необхідно охопити широкий спектр частот. Крім того, її здатність підтримувати резонанс на різних частотах дозволяє досягати високої ефективності випромінювання та підсилення сигналу в різних умовах експлуатації, забезпечуючи надійний зв'язок навіть у складних середовищах.

### Висновки

Аналіз S-параметрів, що вказує на наявність трьох яскраво виражених частот прийому сигналів в антені, може свідчити про те, що антена має одночасно ширококутові та резонансні властивості у деяких частотних діапазонах. Це означає, що антена може ефективно приймати та/або передавати сигнали на цих частотах. Отримані результати дають можливість виділити наступні особливості ширококутових антен, виходячи із дослідженої LDPA-антени:

- антена розрахована на роботу на декількох частотах. Це може бути корисно в системах, які потребують роботи на різних каналах або частотних діапазонах одночасно, що дозволяє одному антенному пристрою підтримувати декілька стандартів зв'язку.

- резонансні частоти, на яких антена має мінімальні втрати (низький коефіцієнт відбиття, S11) та відбувається ефективна передача та прийом сигналу свідчать про оптимальну ефективність антени в цих точках, що може бути використано для специфічних застосувань або протоколів.

В системах зв'язку, таких як мобільні телефони або маршрутизатори, може бути необхідність підтримувати роботу на кількох частотних діапазонах, що робить такі антени особливо корисними.

При аналізі діаграм направленості досліджуваних антен виявилось, що Patch-антени забезпечують більшу геометричну площу покриття, тому їх перевагою є незалежність від геометрії розміщення «передавач-приймач», але потенційно LDPA-антени мають кращу завадостійкість і можуть забезпечити зв'язок між більшою кількістю абонентів.

У 5G системах, які працюють на високих частотах, аналіз S-параметрів стає ще більш важливим для забезпечення ефективної передачі даних. Він допомагає в проектуванні антен з багаточастотними характеристиками, що підвищує адаптивність і продуктивність мережі.

Аналіз S-параметрів антен є ключовим для забезпечення ефективної роботи бездротових систем зв'язку, таких як Wi-Fi і 5G. Розуміння і оптимізація цих параметрів дозволяє значно покращити якість зв'язку, забезпечити високу швидкість передачі даних і зменшити перешкоди. Сучасні методи аналізу і технології вимірювання дозволяють досягати високих стандартів продуктивності, що є критично важливим для розвитку і впровадження новітніх комунікаційних технологій. Подальші дослідження в цій області можуть привести до нових інновацій у дизайні антен і покращення бездротових систем зв'язку.

### Література

- 1 Sabban A. Wideband RF Technologies and Antennas in Microwave Frequencies. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2016. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119048640>
2. Dual-band MIMO antenna with low mutual coupling for 2.4/5.8 GHz communication and wearable technologies / W. A. Awan et al. PLOS ONE. 2024. Vol. 19, no. 4. P. e0301924. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301924>
3. Refaat S. M., Abdalaziz A., Hamad E. K. I. Tri-Band Slot-Loaded Microstrip Antenna for Internet of Things Applications. Advanced Electromagnetics. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 21–28. URL: <https://doi.org/10.7716/aem.v10i1.1514>
4. Bhaskaran N., Let G. S. Wideband C-Slot Microstrip Antenna for IoT Applications. 2023 First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI), Tiruchengode, India, 19–20 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icaeeci58247.2023.10370961>
5. On-Chip Dual-Band Rectangular Slot Antenna for Single-Chip Millimeter-Wave Identification Tag in Standard CMOS Technology / P. Burasa et al. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65, no. 8. P. 3858–3868. URL: <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2710215>
6. Enahoro, S., Ekpo, S.C., Gibson, A., Chow, K.K., Ji, H., Rabie, K. (2024). Multiband Monopole Antenna Design for Sub-6 GHz 5G Internet of Things Applications. In: Ekpo, S.C. (eds) The Second International Adaptive and Sustainable Science, Engineering and Technology Conference. ASSET 2023. Signals and Communication Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-53935-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53935-0_11)
7. Safari F., Shafai L. A parametric study using ansoft HFSS and ansoft designer on the effect of aperture diameter on the transmission properties of its array. 2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting (ANTEM/URSI 2009), Banff, AB, Canada, 15–18 February 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/antemursi.2009.4805108>
8. A.B. Smolders, H.J. Visser, U. Johannsen. Modern Antennas and Microwave Circuits - A complete master-level course. Eindhoven University of Technology, version September 2020.

9. Mozaffariahrar E., Theoleyre F., Menth M. A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet*. 2022. Vol. 14, no. 10. P. 293. URL: <https://doi.org/10.3390/fi14100293>
10. Transparent and electrically tunable electromagnetic wave absorbing metamaterial / Y. Liu et al. *Applied Physics Letters*. 2022. Vol. 120, no. 9. P. 094101. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0083047>
11. Keysight | FieldFox Handheld Analyzers 4/6.5/9/14/18/26.5/32/44/50 GHz - Data Sheet. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-9836EN.pdf>.
12. F. Caspers, P. McIntosh, T. Kroyer RF engineering basic concepts: S-parameters. CERN, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.5170/CERN-2011-007.67>

### References

- 1 Sabban A. *Wideband RF Technologies and Antennas in Microwave Frequencies*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2016. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119048640>
2. Dual-band MIMO antenna with low mutual coupling for 2.4/5.8 GHz communication and wearable technologies / W. A. Awan et al. *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, no. 4. P. e0301924. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301924>
3. Refaat S. M., Abdalaziz A., Hamad E. K. I. Tri-Band Slot-Loaded Microstrip Antenna for Internet of Things Applications. *Advanced Electromagnetics*. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 21–28. URL: <https://doi.org/10.7716/aem.v10i1.1514>
4. Bhaskaran N., Let G. S. Wideband C-Slot Microstrip Antenna for IoT Applications. 2023 First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI), Tiruchengode, India, 19–20 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icaeeeci58247.2023.10370961>
5. On-Chip Dual-Band Rectangular Slot Antenna for Single-Chip Millimeter-Wave Identification Tag in Standard CMOS Technology / P. Burasa et al. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65, no. 8. P. 3858–3868. URL: <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2710215>
6. Enahoro, S., Ekpo, S.C., Gibson, A., Chow, K.K., Ji, H., Rabie, K. (2024). Multiband Monopole Antenna Design for Sub-6 GHz 5G Internet of Things Applications. In: Ekpo, S.C. (eds) *The Second International Adaptive and Sustainable Science, Engineering and Technology Conference. ASSET 2023. Signals and Communication Technology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-53935-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53935-0_11)
7. Safari F., Shafai L. A parametric study using ansoft HFSS and ansoft designer on the effect of aperture diameter on the transmission properties of its array. 2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting (ANTEM/URSI 2009), Banff, AB, Canada, 15–18 February 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/antemursi.2009.4805108>
8. A.B. Smolders, H.J. Visser, U. Johannsen. *Modern Antennas and Microwave Circuits - A complete master-level course*. Eindhoven University of Technology, version September 2020.
9. Mozaffariahrar E., Theoleyre F., Menth M. A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet*. 2022. Vol. 14, no. 10. P. 293. URL: <https://doi.org/10.3390/fi14100293>
10. Transparent and electrically tunable electromagnetic wave absorbing metamaterial / Y. Liu et al. *Applied Physics Letters*. 2022. Vol. 120, no. 9. P. 094101. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0083047>
11. Keysight | FieldFox Handheld Analyzers 4/6.5/9/14/18/26.5/32/44/50 GHz - Data Sheet. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-9836EN.pdf>.
12. F. Caspers, P. McIntosh, T. Kroyer RF engineering basic concepts: S-parameters. CERN, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.5170/CERN-2011-007.67>