

МІШАН ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2771-7285>e-mail: v_mishan@ukr.net

АКУЛІНІЧЕВ АРТЕМ

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0000-0002-2105-1603>e-mail: artem.akulynichev@nure.ua

КОЛОМІЄЦЬ ЄВГЕНІЙ

Хмельницький національний університет

e-mail: zh.k.998@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПАКТНИХ ЛОГПЕРІОДИЧНИХ ДИПОЛЬНИХ АНТЕН ІЗ РОЗШИРЕНОЮ НИЗЬКОЧАСТОТНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ

У даній роботі проведено огляд різних методів мініатюризації друкованих логперіодичних дипольних антен з метою зменшення їхніх розмірів. По-перше, робота включає конструкцію звичайної друкованої логперіодичної дипольної антени, яка працює в широкому діапазоні частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц і має прийнятний коефіцієнт підсилення в більшій частині своєї смуги пропускання. Ця антена служить базовою моделлю для подальших досліджень та оптимізації. У роботі також описано новий метод розширення низькочастотної характеристики цих антен, який полягає у заміні найдовшого прямого диполя на трикутну дипольну структуру та оптимізації чотирьох найдовших диполів. Як результат, отримана покращена антена спроможна працювати у діапазоні від 0,4 ГГц до 8 ГГц з деяким зниженням коефіцієнта підсилення на низьких частотах.

Ключові слова: CST моделювання; логперіодичні дипольні антени; UWB антени; підсилення; діаграма спрямованості; надширокозмуговий зв'язок.

MISHAN VIKTOR

Khmelnyskyi National University

AKULYNICHEV ARTEM

Kharkiv National University of Radioelectronics

KOLOMYETS EVGENY

Khmelnyskyi National University

OPTIMIZATION OF COMPACT LOG-PERIODIC DIPOLE ANTENNAS WITH EXTENDED LOW-FREQUENCY CHARACTERISTICS

With the rapid technological advancements over the last decade, there is an increased demand for new generation wireless devices and communication systems. This work provides an overview of various methods of miniaturization of printed log-periodic dipole antennas in order to reduce their size. First, the work involves the design of a standard printed log-periodic dipole antenna that operates over a wide frequency range from 0.7 GHz to 8 GHz and has an acceptable gain over most of its bandwidth. This antenna serves as a baseline model for further research and optimization. Furthermore, this paper introduces a novel approach to extending the low-frequency response of these antennas. The approach entails replacing the longest direct dipole with a triangular dipole structure and optimizing the dimensions of the four longest dipoles. The outcome is an enhanced antenna capable of operating within the 0.4 GHz to 8 GHz range, albeit with a minor reduction in gain at lower frequencies. The research on extending the low-frequency response of printed log-periodic dipole antennas holds promise for enhancing antenna systems' performance across various applications, including wireless communications, radar, and satellite communications. The findings of this study can serve as a foundation for further innovations and developments in the field of antenna technology, making a significant contribution to the advancement of modern wireless technologies. This work is particularly valuable for engineers and scientists working in the realm of antenna technology and wireless communications. It introduces a fresh perspective on enhancing the low-frequency performance of printed log-periodic dipole antennas, which may find applications in diverse radio communication systems, thus addressing the growing demand for compact yet efficient antenna solutions in the ever-evolving world of wireless technology.

Keywords: CST simulations; printed log-periodic dipole array antennas; UWB antennas; amplification; directional diagram; ultra-broadband communication.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зі стрімким технологічним прогресом за останнє десятиліття зростає попит на бездротові пристрої та системи зв'язку нового покоління. Надширокозмуговий діапазон частот від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц законодавчо затверджений Федеральною комісією зв'язку для використання з системами бездротового зв'язку [1, 2]. Для більшості надширокозмугових систем потрібні антени з великою смугою пропускання. Декілька дослідників пропонують використовувати монопольні антени для цього застосування [3]. Однак, хоча деякі монопольні антени можуть мати широку смугу пропускання, вони не забезпечують фіксовану діаграму спрямованості для всього діапазону частот, і тому для цього застосування потрібні альтернативні антени. Антени Вівальді, також відомі як кінчні щілинні антени, також вважаються хорошими варіантами для надширокозмугових застосувань через їх стабільну діаграму спрямованості в робочому діапазоні частот і їх здатність випромінювати або приймати потужність у напрямку кінцевої точки [4]. Однак розмір цих антен може бути великим, залежно від найнижчої робочої частоти. Отже, для таких застосувань віддають

перевагу ширококуговим LPDA-антенам (логоперіодична дипольна антена (LPDA, log-periodic dipole antenna), оскільки вони є спрямованими, забезпечують рівномірне зростання підсилення, широкий діапазон частот, і можуть бути виготовлені за низькими витратами [5]. Крім того, вони випромінюють у кінцевій точці, а також створюють близько розташовані множинні резонанси в робочому діапазоні частот.

Крім того, ширококугові спрямовані антени також дуже важливі для промислових та військових організацій для застосувань у сфері визначення напрямку на широкому діапазоні частот. Такі застосування вимагають спрямованих ширококугових антен для визначення кута джерела сигналу в азимутальній площині, а також для можливості приймати сигнал на широкому діапазоні частот [6]. Крім того, методи визначення напрямку також використовуються в цивільних застосуваннях для відстеження та місцезнаходження цілей. Стационарна система відеоспостереження потребує антени для визначення напрямку у формі масиву, який складається з кількох антенних елементів, розташованих у круглій формації.

Аналіз досліджень та публікацій

Елементи антени можуть належати до кількох типів антен, таких як дипольні антени, монопольні антени, біконусні антени, логарифмічні антени та антени Вівальді. У статті [6] пропонується переносна ширококугова антена для визначення напрямку. Антени для визначення напрямку також знайшли застосування на ринку безпілотників, де ці системи антен встановлюються на транспортних засобах, як вивчено у роботах [7, 8]. LPDA-антени широко використовуються для застосувань у визначенні напрямку завдяки своїй високо спрямованій характеристиці випромінювання, що призводить до достатнього співвідношення переднього та заднього напрямку в широкому діапазоні частот [8]. Проте розміри LPDA-антен можуть бути великими, і, отже, існує потреба у зменшенні їх розмірів, наприклад, для їхнього використання на безпілотниках.

Антени також використовуються в анекоїчних і ревербераційних камерах для вимірювань електромагнітної сумісності, де вони використовуються як джерело електромагнітного випромінювання. Такий тип вимірювань передбачає, що джерело антени має бути компактними та мати ширококугові характеристики. LPDA-антени також вважаються одними з найкращих варіантів для цього застосування.

Концепція частотно-незалежних антен була вперше запропонована в роботі [9]. Запропоноване дослідження послужило основою для винаходу LPDA антени в наступні роки, як це було показано в [10]. Оскільки LPDA антени можуть працювати в широкому діапазоні частот і забезпечувати рівномірний підсилення та високо спрямоване випромінювання, вони є перспективними варіантами для застосувань, таких як системи надширококугового зв'язку, визначення напрямку, електромагнітної сумісності та радару.

Проте для деяких з вищезазначених застосувань розміри антени повинні бути досить невеликими. Це обмежує можливість використання LPDA антен, оскільки для низьких частот розмір деяких дипольних елементів є великим, і тому існує попит на менші альтернативні антени. З метою зменшення розмірів LPDA антен було проведено кілька досліджень, включаючи проектування мікросмужкових друкованих LPDA антен [11, 12]. Переваги проектування друкованих LPDA антен включають у себе мініатюризацію та низькі витрати на виготовлення. У цій статті розглядаються методи мініатюризації, які були запропоновані дослідниками, і додатково пропонується нова конструкція мініатюризованої друкованих LPDA антен з розширеною низькочастотною характеристикою, яка працює в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

Виклад основного матеріалу

Було проведено кілька досліджень і запропоновано декілька методів для зменшення розміру друкованих LPDA антен. Представлено ширококугову друковану LPDA антену з 25 диполями, яка має робочий діапазон від 0,7 ГГц до 8 ГГц. Розміри для друкованої LPDA антен були отримані з використанням звичайних рівнянь LPDA, введених Каррелом [12], а потім обчисленням розмірів з урахуванням відносної діелектричної проникності підкладки антени. Принципова схема звичайної LPDA антени показана на рисунку 1.

Кут при вершині – це половина кута, у якому розташовані всі диполі, і він математично виражається як

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \tau}{4\sigma} \right]. \quad (1)$$

У наведеному вище виразі параметр τ називається «коефіцієнтом масштабування» і є відношенням довжин або діаметрів двох послідовних диполів, як показано в наступному виразі:

$$\tau = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n}, \quad (2)$$

де L_n і d_n – довжина і діаметр n -го диполя. Крім того, параметр σ , показаний у виразі (1), називається «коефіцієнтом інтервалу» і визначається як:

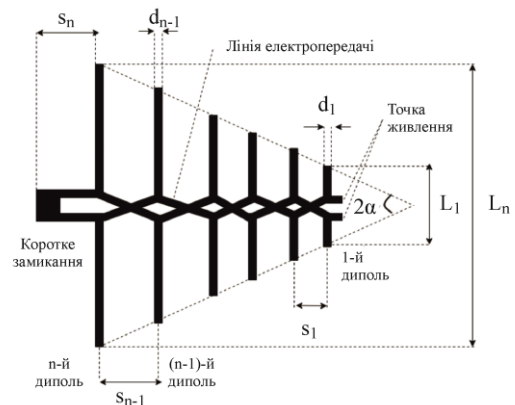


Рис. 1. Принципова схема звичайної LPDA антени

$$\sigma = \frac{s_n}{2L_n}, \tag{3}$$

де s_n – відстань між n -м диполем і його послідовним $(n + 1)$ -м диполем. Загальні фізичні розміри антени значно залежать від двох вищезазначених факторів (τ і σ).

Для задоволення вимог щодо смуги пропускання і коефіцієнта підсилення конструкція антени має забезпечити коефіцієнт підсилення вище 5 дБі в усьому діапазоні роботи, і, таким чином, для задоволення специфікацій щодо смуги пропускання і коефіцієнта підсилення було вибрано 25 диполів. Подібно до звичайних LPDA антен, ця друкована LPDA антена також складається з диполів, які розташовані в зростаючому порядку від передньої до задньої частини антени. Єдина відмінність полягає в тому, що діелектрична підкладка (FR4) з відносною діелектричною проникністю 4,3 присутня між верхньою та нижньою частиною, а не в повітрі. Таким чином, можна припустити, що верхня частина та диполі, прикріплені до неї, вбудовані у верхню частину підкладки, тоді як нижня частина та диполі, прикріплені до нижньої частини підкладки. Товщина підкладки становить 1 мм. Живлення антени забезпечується за допомогою коаксіального кабелю, який підключений до верхньої штанги. Провідна частина кабелю приєднується на початок нижньої штанги. Габаритні розміри запропонованої антени: 250 мм × 170 мм × 1 мм (довжина × ширина × товщина). Змодельована модель антени показана на рисунку 4,а.

Модель CST складалася з 83 184 192 шестикутних елементів сітки з найменшим розміром елемента 0,35 мм. Моделювання цієї моделі було виконано в часовій області з точністю -50 дБ.

Вимірювання підсилення здійснювалися за допомогою методу двох антен, де дві ідентичні виготовлені антени використовувалися для вимірювання коефіцієнта S12 від однієї антени до іншої. На рисунку 2 представлено коефіцієнт відбиття запропонованої конструкції антени. На графіку видно, що антена має низький S11 нижче -10 дБ у всьому робочому діапазоні частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц. Таким чином, антена досягає хорошого узгодження. Крім того, графік також свідчить про те, що змодельовані результати загалом добре узгоджуються з вимірюваннями.

На рисунку 3 представлено змодельоване підсилення антени. Антена досягає рівного підсилення приблизно 5,5 дБі в робочому діапазоні частот. Змодельовані результати добре узгоджуються. Коефіцієнт підсилення антени вимірювали методом двох антен.

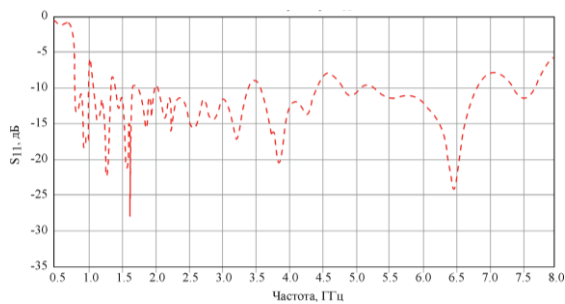


Рис. 2. Коефіцієнт відбиття запропонованої конструкції антени

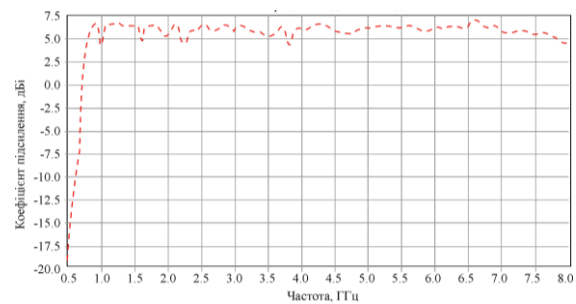


Рис. 3. Моделювання коефіцієнта підсилення антени типу друкованої LPDA антени

Для розширення нижньої робочої частоти антени, запропоновано новий варіант антени, яка працює в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц. З принципу роботи звичайних антен типу друкованої LPDA антени очевидно, що продуктивність антени на нижчих частотах залежить від декількох найдовших диполів. Отже, найдовший прямиий диполь було замінено на трикутний диполь для збільшення підсилення та ширини смуги антени. З введенням цього нового типу диполя було виконано оптимізацію довжини найдовших чотирьох диполів, трьох інтервалів та чотирьох ширин диполів. Крім того, у [13] представлено порівняльне дослідження кількох алгоритмів оптимізації. Цілі оптимізації були встановлені для отримання значень S11 нижче -12 дБ і вищого підсилення понад 5,5 дБ у діапазоні частот від 0,4 ГГц до 1,2 ГГц. Решта диполів і частот, які не були враховані в процесі оптимізації, практично не впливають на частоти вище 1,2 ГГц, оскільки враховано лише розміри чотирьох найдовших диполів. Задачі оптимізації можна чітко побачити у таблиці 1.

Таблиця 1

Цілі оптимізації

| Параметри | Цілі | Частота |
|-----------------|---------|-------------------|
| S ₁₁ | <-12 дБ | 0.4 ГГц – 1.2 ГГц |
| Підсилення | > 5 дБі | 0.4 ГГц – 1.2 ГГц |

На рисунку 4,б показана модель CST оптимізованої антени. Модель складалася з 92 452 080 елементів шестигранної сітки з найменшим розміром одиниці сітки 0,35 мм. Моделювання проводилося у часовій області з точністю до -50 дБ. Загальні розміри оптимізованої друкованої LPDA антени становлять 270 мм × 279 мм × 1 мм (довжина × ширина × товщина). Якби така сама антена була розроблена з використанням звичайних рівнянь проектування друкованої LPDA, загальні розміри цієї антени були б приблизно 380 мм ×

300 мм × 1 мм. Таким чином, очевидно, що довжина покращеної друкованої LPDA антени зменшена на 29% порівняно зі звичайною друкованою LPDA, розробленим для того самого діапазону частот.

На рисунку 5 представлено змодельовану модель S_{11} для запропонованої антени типу друкованої LPDA антени. Це свідчить про те, що антена має хороше узгодження з низькими значеннями S_{11} нижче -10 дБ у більшій частині діапазону робочих частот. На деяких частотах потрібні подальші вдосконалення.

На рисунку 6 показано змодельоване реалізоване підсилення запропонованої антени. На графіку видно, що антена забезпечує підсилення понад 5,5 дБі в більшій частині діапазону частот; однак нижчі значення підсилення спостерігаються від 0,4 ГГц до 1 ГГц. Однак реалізований показник підсилення значно вищий у нижніх частотах, ніж у випадку звичайної конструкції з антеною, яка лише трохи довша (270 мм замість 250 мм), але значно ширша (279 мм замість 170 мм). Показники роботи запропонованої антени можуть бути додатково покращені шляхом впровадження інших методів підсилення та повторної оптимізації антени.

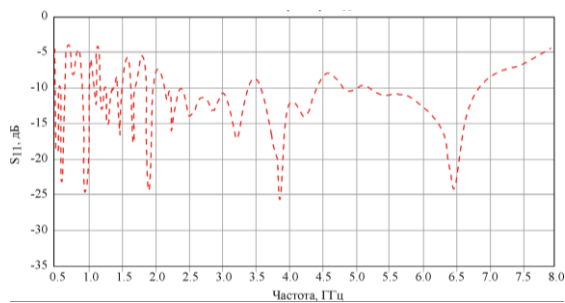


Рис. 5. Графік S_{11} для вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени

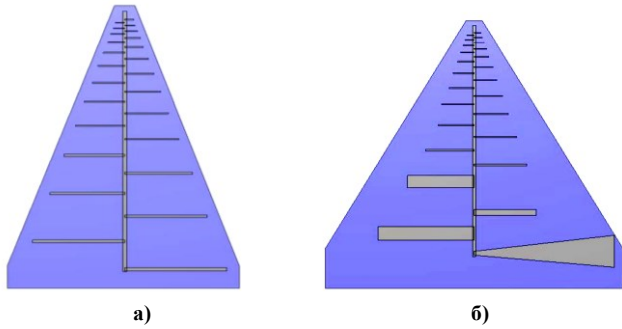


Рис. 4. Модель CST а) звичайної та б) запропонованої антени типу друкованої LPDA антени

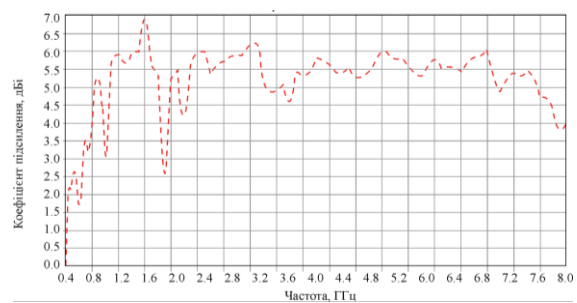


Рис. 6. Змодельоване підсилення вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени

На рисунку 7 показано співвідношення передньої і задньої сторін запропонованої конструкції друкованої LPDA антени. Це показує, що антена має високі характеристики спрямованості; однак можна покращити ефективність антени в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 0,7 ГГц.

На рисунку 8 показано полярні графіки змодельованої діаграми спрямованості E-площини вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени на 0,4 ГГц, 0,8 ГГц, 2 ГГц, 4 ГГц, 6 ГГц, та 8 ГГц відповідно. Це також свідчить про те, що антена демонструє стабільні діаграми спрямованості у всьому діапазоні частот.

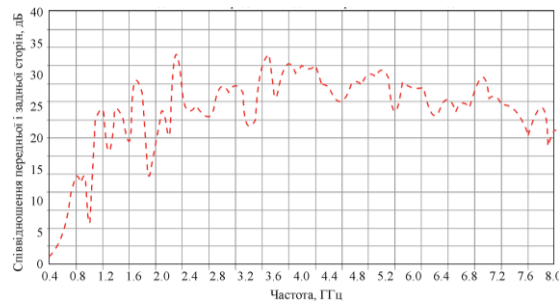


Рис. 7. Співвідношення передньої і задньої сторін покращеної конструкції друкованої LPDA антени

Висновки

У цій статті розглядаються методи мініатюризації для зменшення розміру антен з логарифмічною періодичною структурою друкованої LPDA антени. Запропоновано дві моделі друкованої LPDA антени, які працюють у широкій смузі пропускання. Перша запропонована модель – це 25-дипольна друкована LPDA антена, який працює від 0,7 ГГц до 8 ГГц і забезпечує коефіцієнт підсилення понад 5,5 дБі. Друга модель є оптимізованою конструкцією першої моделі, яка містить трикутний найдовший диполь замість прямого диполя. Заміна форми найдовшого диполя та оптимізація довжини, діаметра та відстані чотирьох найдовших диполів забезпечує вищу пропускну здатність порівняно з першим прототипом. Оптимізована конструкція працює в діапазоні від 0,4 ГГц до 8 ГГц і забезпечує підсилення понад 5 дБі в більшій частині смуги пропускання.

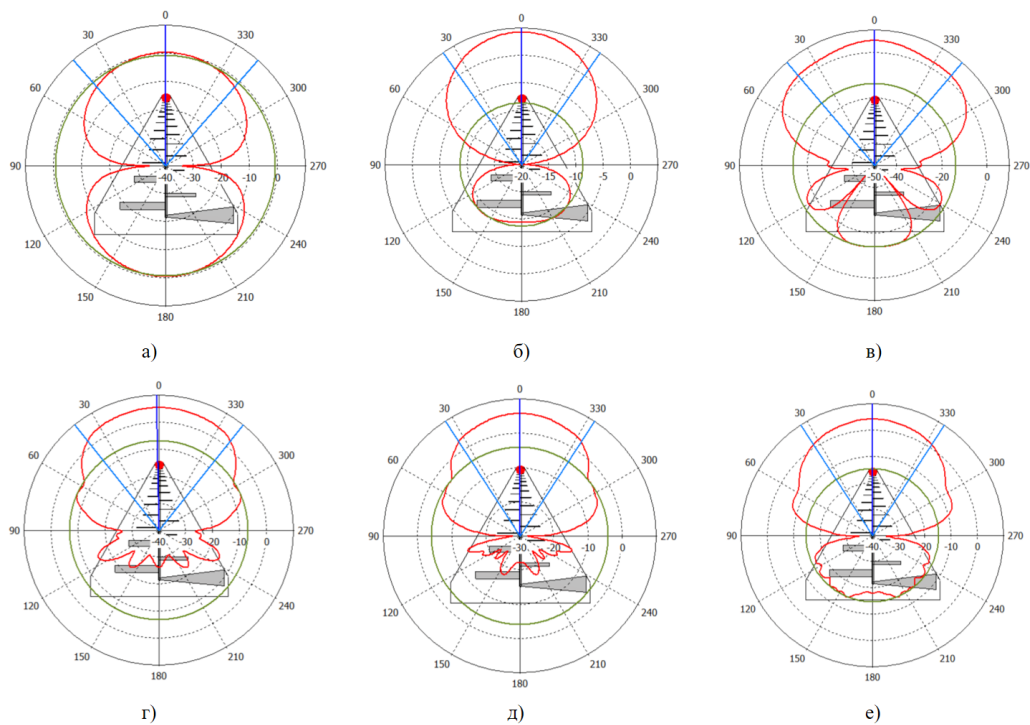


Рис. 8. Полярні графіки діаграм спрямованості випромінювання запропонованої антени в Е-площині

References

1. FCC. FCC First Report and Order on Ultra-Wideband Technology. https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf
2. ECC Std. ECC Decision of 24 March 2006 on the Harmonised Conditions for Devices Using Ultra-Wideband (UWB) Technology in Bands Below 10.6 GHz. 2006. <http://www.ero.dk/>
3. Mohamadzade, B.; Simorangkir, R.B.V.B.; Hashmi, R.M.; Lalbakhsh, A. A Conformal Ultrawideband Antenna with Monopole-Like Radiation Patterns. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020, 68, 6383–6388.
4. Gautam, A.K.; Yadav, S.; Kanaujia, B. A CPW-Fed Compact UWB Microstrip Antenna. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2013, 12, 151–154.
5. Mistry, K.K.; Lazaridis, P.I.; Zaharis, Z.D.; Chochliouros, I.P.; Loh, T.H.; Gravas, I.P.; Cheadle, D. Optimization of Log-Periodic TV Reception Antenna with UHF Mobile Communications Band Rejection. *Electronics* 2020, 9, 1830.
6. Harrison, R.W.; Jessup, M. A novel log periodic implementation of a 700 MHz–6 GHz slant polarised fixed-beam antenna array for direction finding applications. In *Proceedings of the 2012 42nd European Microwave Conference, Amsterdam, The Netherlands, 29 October–1 November 2012*; pp. 727–730.
7. Huang, Y.; Boyle, K. *Antennas: From Theory to Practice*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2008.
8. Isbell, D. Log periodic dipole arrays. *IRE Trans. Antennas Propag.* 1960, 8, 260–267.
9. Duhamel, R.; Ore, F. Logarithmically periodic antenna designs. *IRE Int. Conv. Rec.* 2005, 6, 139–151.
10. Campbell, C.; Traboulay, I.; Suthers, M.; Kneve, H.; Campbell, C.; Traboulay, I.; Suthers, M.; Kneve, H. Design of a stripline log-periodic dipole antenna. *IRE Trans. Antennas Propag.* 1977, 25, 718–721.
11. Paul, A.; Gupta, I. An Analysis of Log Periodic Antenna with Printed Dipoles. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1981, 29, 114–117.
12. Pantoja, R.; Sapienza, A.; Filho, F. A microwave printed planar log-periodic dipole array antenna. *IRE Trans. Antennas Propag.* 1987, 35, 1176–1178.
13. Lazaridis, P.I.; Tziris, E.N.; Zaharis, Z.D.; Xenos, T.D.; Cosmas, J.P.; Gallion, P.B.; Holmes, V.; Glover, I.A. Comparison of evolutionary algorithms for LPDA antenna optimization. *Radio Sci.* 2016, 51, 1377–1384.