

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-55>

УДК 621.396.12

ПОЛІТАНСЬКИЙ РУСЛАН

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0003-0015-7123>e-mail: 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**ЧЕСАНОВСЬКИЙ ІВАН**

Національна академія Державної прикордонної служби України

імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0002-8161-3276>e-mail: chesanov.i@gmail.com

ЩІЛИННИЙ АНТЕННИЙ ПРИСТРІЙ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ІЗ 4-ПОРТОВИМ ПІДВЕДЕННЯМ СИГНАЛУ

Актуальність досліджень обумовлена потребою у високоефективних антенах для мікрохвильового та міліметрового діапазонів. Ці пристрої характеризуються високою мініатюризацією та залежністю від параметрів, таких як розміри, товщина підкладки, методи підведення сигналу. У якості прототипу вибрана класична щілинна антена, модифікована шляхом зменшення її розмірів до 4×4 см² та збільшення кількості портів до 4. Досліджено частотну залежність коефіцієнту відбивання вхідного сигналу та просторову діаграму направленості. Резонансні частоти в діапазоні 5-15 ГГц забезпечують коефіцієнт підсилення від 2.72 до 6.35. Виявлено, що взаємодія між портами підведення сигналу відсутня. Результати порівняні з іншими пристроями в мікрохвильовому діапазоні. Дослідження проведено в ANSOFT HFSS і можуть бути застосовані в телекомунікаційних системах, таких як IoT та кіберфізичні системи.

Ключові слова: щілинна антена, мікрохвильовий діапазон, пристрої IoT, 5G, кіберфізичні системи, ANSOFT HFSS, кодування.

POLITANSKY RUSLAN

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

PLOSHCHYK ANNA, CHESANOVSKIY IVAN

The Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine

SLOT ANTENNA DEVICE FOR MICROWAVE RANGE WITH 4-PORT SIGNAL FEEDING

The relevance of this research is determined by the need for high-performance antenna devices that can be used in microwave and millimeter-wave frequency ranges. These devices are characterized by a high degree of miniaturization compared to other frequency ranges, as well as a complex dependence on various parameters such as geometric dimensions, substrate thickness, and signal feeding methods. The prototype selected is a classic slot antenna, modified by reducing its size to a surface area of 4×4 cm² and increasing the number of signal feeding ports to four. The study involved investigating the frequency dependence of the reflection coefficient of the input signal relative to the dielectric substrate thickness in the range of 5 to 15 GHz. Additionally, the spatial radiation pattern of the antenna was examined. Based on the obtained results, resonance frequencies in the range of 5 to 15 GHz were identified, where the reflection coefficient of the input signal does not exceed -10 dB, and the antenna gain coefficient ranges from 2.72 to 6.35. It was also found that there is no significant interaction between the individual signal feeding ports. The obtained characteristics were compared with other devices operating in the microwave and millimeter-wave ranges. The loss coefficient associated with signal reflection at resonance frequencies is comparable to the results presented in the review section. The spatial radiation pattern of the investigated antenna (quad-slot antenna) features narrow directed beams, providing a high antenna gain coefficient, whereas many devices described in the literature exhibit either nearly isotropic or semi-isotropic patterns. The research was conducted using the student version of the ANSOFT HFSS software. The developments can be applied to advanced telecommunication systems designed to meet high-speed and stability requirements, such as the Internet of Things (IoT) and cyber-physical systems. The results of this research hold potential for practical implementation in future communication systems, offering scientific value in terms of high-frequency antenna device evaluation methods.

Keywords: slot antenna, microwave range, IoT devices, 5G, cyber-physical systems, ANSOFT HFSS, coding.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Використання мікрохвильового (1 ГГц - 30 ГГц) та міліметрового (більше 30 ГГц) частотних діапазонів потребує розробки, вдосконалення і впровадження нових технологічних рішень. Ключовою особливістю досліджуваних на сьогоднішній день технологій мікрохвильового та міліметрового діапазонів є формування вузьконаправлених променів та кодування інформації, яке має суттєві відмінності від кодування, що засноване на класичних цифро-аналоговому та аналого-цифровому перетвореннях [1].

Суттєво змінюються також вимоги до випромінюючих та приймальних пристроїв цих високочастотних діапазонів. Найбільш суттєвими відмінностями від передавальних пристроїв, що використовувались у частотних діапазонах попередніх технологій передачі інформації, є мініатюризація та високий коефіцієнт підсилення антени за рахунок вузьконаправленої діаграми випромінювання. Ці особливості однозначно пов'язані зі зменшенням довжини хвилі. По-перше, зменшення довжини хвилі призводить до зменшення

геометричних розмірів випромінюючих пристроїв. По-друге, відповідно до моделі Фріза коефіцієнт затухання сигналу є обернено пропорційний до квадрату довжини хвилі, якщо сигнал поширюється від приймача до передавача безперешкодно.

Аналіз досліджень та публікацій

Розглянемо роботи авторів, у яких описуються пристрої мікрохвильового та міліметрового діапазонів. У роботі [2] описана трисмугова монопольна антена, яка має резонансні частоти 2.3, 4.8, та 7 ГГц, коефіцієнт втрат відбитого сигналу становить -13, -19 і -15 дБ. Розміри діелектричної підкладки цієї антени, виготовленої із стандартного матеріалу з діелектричною проникністю 4.4, становили $10 \times 30 \times 1.6$ мм×мм×мм. При цьому діаграма випромінювання антени для різних частот підведеного сигналу виявилася такими: напівізотропною для підведеного сигналу із частотою 2.3 ГГц, має дві ширококутні пелюстки для частоти сигналу 4.8 ГГц, і одну ширококутну пелюстку для сигналу із частотою 7 ГГц. Тобто для усіх трьох резонансних частот антена виявилася ширококутною. У роботі [3] представлена багатоканальна антена, яка працює одночасно як у мікрохвильовому (2.5/3.5/5.5/7.5 ГГц), так і міліметровому діапазонах (23 – 31 ГГц) із найбільшим коефіцієнтом втрат на відбиття сигналу, який становить -10 дБ. Розміри діелектричної підкладки цього пристрою становлять $16 \times 21 \times 1.6$ мм×мм×мм, а її діелектрична проникність дорівнює 2.2. Ця антена є практично ізотропною для усіх приведених частотних діапазонів. Антена використовує багатопортове підведення сигналів, що, на думку авторів, може бути застосованим у системах МІМО: розглядаються конфігурації масивів, які мають розмірності 2×2 , 2×4 та 3×4 .

Завдяки мініатюризації антенних пристроїв у мікрохвильовому, міліметровому та терагерцовому частотних діапазонах виникає можливість використання метаповерхні. Одним із прикладів такого використання є лінзові антени [4]. У [4] описується антена, яка використовує поверхневу хвилю, що поширюється на заземленій діелектричній підкладці, і яка має властивості метаповерхні. Ця антена є ширококутною, її можна застосовувати у діапазоні 14-18 ГГц. У роботі [5] описується використання метаповерхні, яка може бути використана як для приймання, так і для передавання сигналів (STAR). Цей пристрій має коефіцієнт відбивання менший як -10 дБ у діапазоні від 25.8 до 40 ГГц, розміри його поверхні становлять 72×72 мм×мм. На відміну від згаданих вище пристроїв, STAR генерує вузьконаправлений промінь. У роботі [6] описується антена на основі плазмових випромінювачів, утворена у вигляді зрізаної піраміди, кожна грань якої є плоскою ФАР із елементами якої є апертури циліндричних плазмово – діелектричних випромінювачів. Автори роботи підкреслюють, що у подібних системах, які є багатопортовими з точки зору підведення сигналу, виникає необхідність вирішувати проблему електромагнітної взаємодії між сусідніми випромінювальними елементами. У роботі [7] розглядається лінійна антенна решітка, у якій запропоновано використовувати додаткові випромінювачі, аналогічні основним випромінювачам решітки, за рахунок чого значно збільшується коефіцієнт підсилення антенної решітки.

З точки зору властивостей направлено випромінювання та оптимального значення коефіцієнту втрат є ряд інших мініатюризованих антенних пристроїв, прототипом яких є традиційні антенні конструкції: логперіодична трапецієподібна антена [8, 9], планарний масив диполів із підкладкою, що має анізотропні магнітні властивості та різницею фаз підведеного сигналу [10].

У зв'язку із переходом до нових частотних діапазонів значно ускладнюється проблема боротьби із завадами, що виникають внаслідок багатопроменного поширення сигналів. Одним із методів вирішення цієї проблеми є використання антен із вузькою діаграмою направленості [11], що забезпечує можливість утворення окремих просторових каналів із незначною електромагнітною взаємодією між ними.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: вирішення науково-технічної проблеми визначення та оптимізації параметрів випромінюючого антенного пристрою, що працює у мікрохвильовому діапазоні, і забезпечує низький коефіцієнт відбивання вхідного сигналу та високий коефіцієнт підсилення. Відповідно до поставленої мети, у роботі проведені дослідження мініатюризованої антени із 4-портовим підведенням сигналу мікрохвильового діапазону частот (1-15 ГГц), яка є модифікацією класичної щільної антени. Визначені частотні характеристики її вхідного імпедансу та просторові діаграми випромінювання для різних значень товщини її підкладки.

Виклад основного матеріалу

Прототипом розробленої антени є класична симетрична щільна антена із однопортовим підведенням сигналу, конструкція якої приводиться на рис.1. Розглянута антена має один канал, на частоті 1.1 ГГц, як це видно з її характеристики відбивання сигналу, що приводиться на рис.2.

Спостерігається один мінімум відбивання, який має місце на частоті вхідного сигналу 1.1 ГГц. Тому ця антена має один широкосмуговий канал, глибина каналу становить -18 дБ, а ширина 150 МГц на рівні -10 дБ.

Приведемо також просторові характеристики випромінювання щільної антени, побудовані у полярних координатах, які відображені на рис.3, де зображено сімейство кривих, побудованих для діапазону значень кута у горизонтальній площині від 0° до 180° із кроком 5° . Як видно із рис.3, інтенсивність випромінювання рівномірно розподіляється у горизонтальній площині, тобто антена випромінює енергію однаково в усіх напрямках відносно своєї осі. У вертикальній площині спостерігаються дві широкі пелюстки із азимутальними кутами 0° і 180° . У напрямку цих кутів коефіцієнт підсилення антени досягає свого максимального значення 3.0.

Однією із застосованих модифікацій є збільшення кількості портів антени до чотирьох, які працюють синфазно, іншою є її мініатюризація.

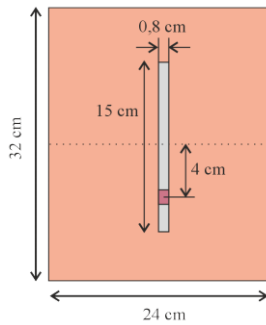


Рис. 1. Конструкція однопортової щілинної симетричної антени

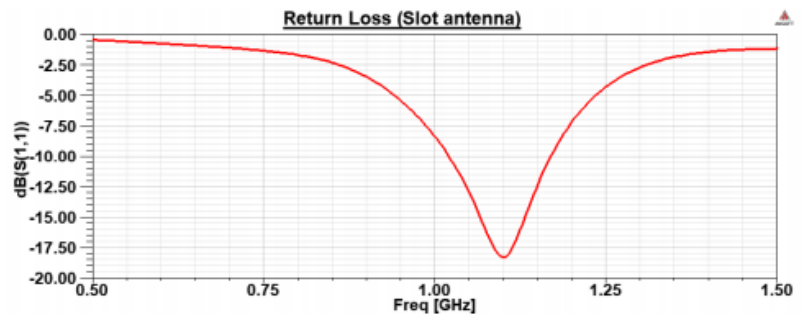


Рис. 2. Частотна характеристика відбивання вхідного сигналу щілинної антени.

З метою мініатюризації пристрою були змінені розміри квадрощілинної антени: розміри підкладки: $4 \times 4 \text{ см}^2$, товщина підкладки варіювалася від 3 мм до 10 мм з кроком 1 мм, довжина випромінюючих щілин становила 2,5 см. Більш детально усі розміри пристрою приведені на рис. 4. Для підвищення коефіцієнту підсилення випромінювача тильна сторона підкладки антени має властивості ідеальної провідної поверхні.

Radiation Pattern of slot antenna at 1 GHz {phi=0.5:180}

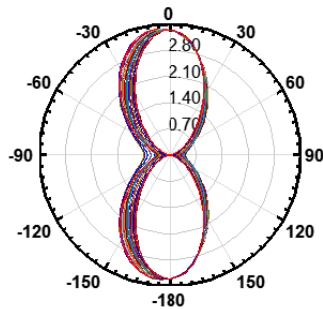


Рис. 3. Діаграма направленості симетричної щілинної антени у полярних координатах

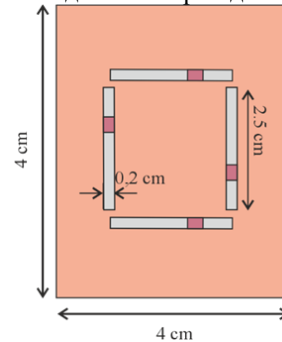


Рис. 4. Схема мініатюризованої квадрощілинної антени із 4-портовим підведенням високочастотного сигналу

Приведені розміри антени є порівняними з іншими пристроями, призначеними для роботи у мікрохвильовому та міліметровому діапазонах, для яких приведений опис експериментального макету досліджуваних пристроїв [2, 3, 4, 5].

Результати дослідження квадрощілинної антени

Дослідження мініатюризованої антени показали, що вона має декілька резонансних частот, при яких має місце мінімум коефіцієнту відбивання вхідного сигналу, і які є однаковими для усіх чотирьох портів антени. Приведені на рис.5 характеристики побудовані для товщин діелектричної підкладки антени, які змінювалися від 3 до 10 мм із кроком 1 мм.

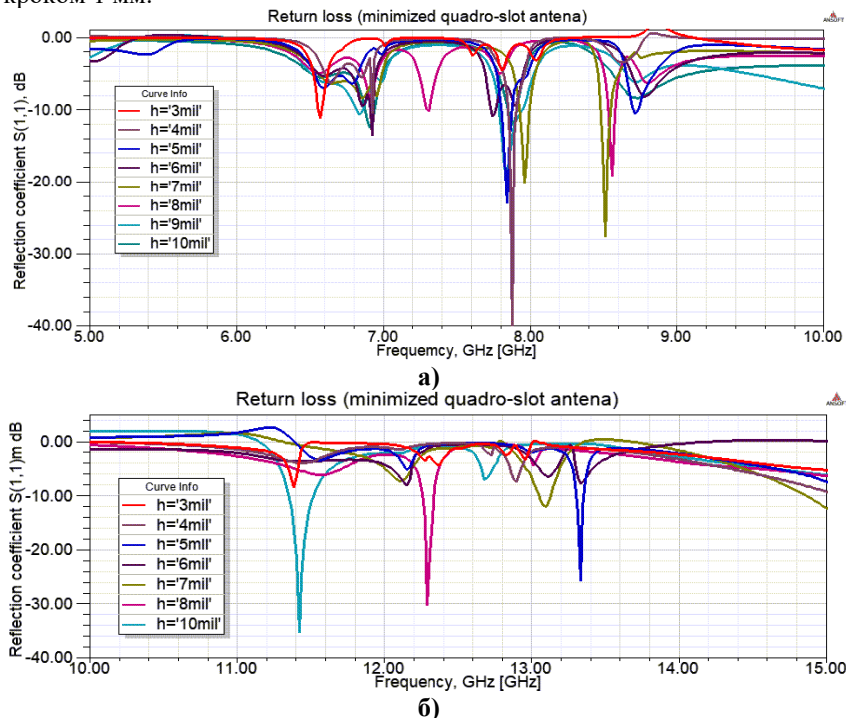
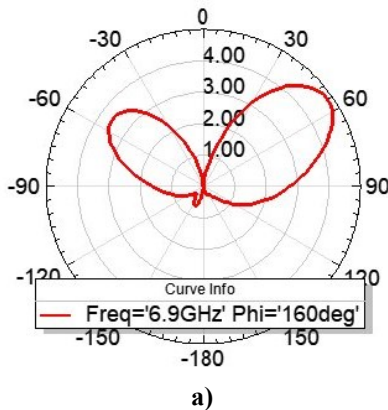


Рис. 5. Частотні характеристики втрат на відбивання вхідного сигналу мініатюризованої квадрощілинної антени: а) 5-10 ГГц; б) 10-15 ГГц

Отже, внаслідок модифікацій значно зросла кількість резонансних частот антени із коефіцієнтом відбивання не меншим, ніж -10 дБ. Мініатюризація пристрою призвела також до зміщення утворених каналів у сторону підвищення резонансних частот: 6.5-14 ГГц (рис. 5), що відповідає відомим теоретичним основам проектування антенних пристроїв.

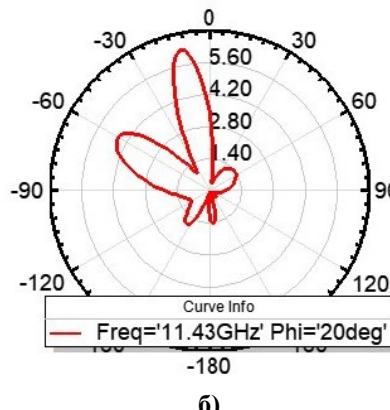
Були також досліджені просторові характеристики мініатюризованого пристрою, результати яких приводяться на рис. 6. Виявлено, що зменшення його розмірів і збільшення кількості портів підведеного сигналу призводить до збільшення коефіцієнту підсилення внаслідок виникнення вузьконаправлених променів. Так, для підкладки товщиною 10 мм виявлені дві резонансні частоти (6.9 та 11.42 ГГц), для яких спостерігається значне збільшення максимального коефіцієнту підсилення антени порівняно із її прототипом (5.02 і 6.35 відповідно).

Radiation Pattern (h=10 mm, f=6.9 GHz)



а)

Radiation Pattern (h=10 mm; f=11.42 GHz)



б)

Рис. 6. Просторові характеристики мініатюризованого квадроцілінного випромінювача із товщиною підкладки 10 мм для сигналів різної частоти: а) 6.9 ГГц; б) 11.42 ГГц

Зведені частотні та просторові характеристики квадроцілінної антени – в таблиці 1.

Таблиця 1

Частотні та просторові характеристики квадроцілінної антени

Товщина підкладки, мм	Резонансні частоти, Гц	Відбитий сигнал, dB (S11)	Максимальний коефіцієнт підсилення антени
3	6.57	-11.2	2.72
3	11.39	-8.5	5.95
5	7.84	-22.9	4.03
6	6.92	-13.6	4.48
8	8.56	-19.3	4.86
9	7.84	-19.2	4.85
10	6.9	-12.6	5.02
	11.42	-35.2	6.35

Відповідно до результатів, що приводяться у Табл.1, антени із товщинами підкладки 3 та 10 мм мають по два частотних канали із високими коефіцієнтами підсилення сигналу. Найкращими із приведених даних є характеристики антени із товщиною підкладки 10 мм, які забезпечують одночасно найменший коефіцієнт відбивання вхідного сигналу, і найбільший коефіцієнт підсилення антени. Таким чином досягнена мета роботи: визначено оптимальну товщину підкладки і частоту вхідного сигналу.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Досліджена квадроцілінна антена може слугувати прототипом метаповерхні шляхом періодичного повторення своєї структури. Це дозволить знайти оптимальні параметри антени, яка матиме резонансні частоти у іще більш високих частотних діапазонах (міліметровому та терагерцовому), а також дозволить підвищити коефіцієнт підсилення антени. Але при цьому має місце проблема значної електромагнітної взаємодії між портами, що може призвести до виникнення стоячих хвиль біля її поверхні, внаслідок чого значно зменшується коефіцієнт її підсилення. При цьому зберігається можливість задавати різницю фаз сигналів у різних точках збудження, використовуючи для цього дійсну і уявну частини імпедансу елементу на поверхні.

Подальше дослідження включатиме тестування антенних характеристик, що дозволить більш точно оцінити її продуктивність у порівнянні з результатами, отриманими шляхом моделювання.

Дослідження впливу мініатюризації та багатоportового підведення сигналу показує, що зменшення розмірів випромінювача призводить до суттєвої зміни частотних характеристик випромінювача: діапазон частот зміщується від 1-3 ГГц до 5-15 ГГц в залежності від товщини підкладки, при цьому значно збільшується кількість резонансних частот, при яких коефіцієнт відбивання не перевищує -10 дБ. Просторова діаграма

мініатюризованого квадроцилінного випромінювача стає вузьконапрямленою при деяких значеннях товщини підкладки і частоти підведеного сигналу. Цікавим результатом є те, що максимальний коефіцієнт підсилення має антена із товщиною підкладки 10 мм, у той час як у роботах інших авторів вплив товщини підкладки не досліджений. Така антена має два частотні резонанси 6.9 та 11.4 ГГц, при яких її коефіцієнт підсилення становить 5.02 і 6.35 відповідно.

Таким чином проведені комплексні дослідження, які дають можливість здійснювати вибір оптимізованих значень частоти вхідного сигналу і товщини підкладки квадроцилінної антени, які забезпечують значення коефіцієнту підсилення антени від 2.7 до 6.35 у мікрохвильовому діапазоні частот (6.9-11.5 ГГц). Крім того, для визначених параметрів також є незначною електромагнітна взаємодія між портами антени.

Досліджені у роботі модифікації щільної антени дозволяють забезпечити більш ефективне передавання інформації у діапазоні мікрохвильових частот. Коефіцієнт втрат досліджених антен є порівняним із аналогічними характеристиками антен, згаданих у вступній частині роботи. При цьому порівняння технологій виготовлення виявляє переваги щільних антен порівняно із дипольними, якщо брати до уваги вимоги до точності геометричних розмірів конструкції антени: так для монопольної мінімальні контрольовані розміри становлять 0.5 мм [2], тоді як для дослідженої у роботі щільної антени – 5 мм. Більш складним порівняно із монопольною антеною є підведення сигналу, оскільки досліджена антена є 4-портовою антеною, але аналіз літературних джерел показує, тенденцію до використання багатопортових антенних пристроїв [3].

Результати проведених досліджень можуть бути використані для проектування антенних пристроїв, що можуть бути використані у пристроях IoT та інших телекомунікаційних системах, де заплановано використовувати мікрохвильовий діапазон частот.

Література

1. R. W. Heath, N. González-Prelcic, S. Rangan, W. Roh and A. M. Sayeed, "An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 10, no. 3, pp. 436-453, April 2016, <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2523924>.
2. S. Prasad Jones Christydass, G. Navaneethakrishnan, R. Palanisamy, C. Ahamed Saleel, Beena Stanislaus Arputharaj. Split ring resonators and composite FR4 substrate for analysis and design of tri-band monopole antenna. Appl. Phys. Lett. 125, 183903 (2024); <https://doi.org/10.1063/5.0237840>.
3. N. Hussain, N. Kim, "Integrated Microwave and mm-Wave MIMO Antenna Module With 360° Pattern Diversity for 5G Internet of Things," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 24, pp. 24777-24789, 15 Dec.15, 2022, <https://doi.org/10.1109/IJOT.2022.3194676>.
4. Ke Pang, Yong-Jun Xie, Wei-Kang Si, Pei-Yu Wu, Sai Chen. On-demand high gain and directional surface wave antenna with 100° field of view based on grounded dielectric metasurface. Appl. Phys. Lett. 126, 251703 (2025); <https://doi.org/10.1063/5.0272683>.
5. Ziolkowski, C.; Kelner, J.M.; Krygier, J.; Chandra, A.; Prokeš, A. Radio Channel Capacity with Directivity Control of Antenna Beams in Multipath Propagation Environment. Sensors 2021, 21, 8296. <https://doi.org/10.3390/s21248296>.
6. В.Д. Карлов, О.В. Бесова, О.В. Лукашук, І.М. Петрушенко. Антена кругового огляду на основі плазмових випромінювачів. Системи озброєння і військова техніка, 2022, № 1(69), ст. 7-16. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.69.01>.
7. В. О. Пелішок, Є. М. Чернихівський. Моделювання та підвищення ефективності скануючих антен на базі лінійних решіток. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіoeлектроніка та телекомунікації» № 885. Ст. 147-154.
8. Ploshchyk, Anna & Politsanskyi, Ruslan & Haliuk, Serhii. (2024). Analysis of Antenna System S-Parameters in Wireless Communication Networks Using HFSS: Role and Significance in Wi-Fi and 5G. 560-563. <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755706>.
9. Політанський Р., Площик А. Моделювання та аналіз параметрів та характеристик ширококутових антенних пристроїв у системах зв'язку Wi-Fi, 5G та мережах IoT. Вісник Хмельницького національного університету, №6, Т.1, 2024 (337). <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-31>.
10. Zhang Tingting, Sun Xuehong. A flaring planar dipole array antenna. Proceedings Volume 13513, The International Conference Optoelectronic Information and Optical Engineering (OIOE2024); 135132H (2025) <https://doi.org/10.1117/12.3045719>.
11. Josep M. Jornet, Edward W. Knightly & Daniel M. Mittleman. Wireless communications sensing and security above 100 GHz. Nature Communications. 2023. 14:841. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36621-x>.

References

1. R. W. Heath, N. González-Prelcic, S. Rangan, W. Roh and A. M. Sayeed. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. Vol. 10, No. 3. P. 436–453. April 2016. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2523924>.
2. S. Prasad Jones Christydass, G. Navaneethakrishnan, R. Palanisamy, C. Ahamed Saleel, Beena Stanislaus Arputharaj. Split ring resonators and composite FR4 substrate for analysis and design of tri-band monopole antenna. Applied Physics Letters. 125, 183903 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0237840>.

3. N. Hussain, N. Kim. Integrated Microwave and mm-Wave MIMO Antenna Module With 360° Pattern Diversity for 5G Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. Vol. 9, No. 24. P. 24777–24789. 15 December 2022. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3194676>.
4. Ke Pang, Yong-Jun Xie, Wei-Kang Si, Pei-Yu Wu, Sai Chen. On-demand high gain and directional surface wave antenna with 100° field of view based on grounded dielectric metasurface. *Applied Physics Letters*. 126, 251703 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0272683>.
5. Ziółkowski C., Kelner J.M., Krygier J., Chandra A., Prokeš A. Radio Channel Capacity with Directivity Control of Antenna Beams in Multipath Propagation Environment. *Sensors*. 2021. 21. 8296. <https://doi.org/10.3390/s21248296>.
6. Karlov V.D., Biesova O.V., Lukashuk O.V., Petrushenko I.M. Circular scanning antenna based on plasma radiators. *Systems of Armament and Military Equipment*. 2022. No. 1(69). P. 7–16. <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.69.01>.
7. Pelishok V.O., Chernykhivskiy Ye.M. Modeling and improving the efficiency of scanning antennas based on linear arrays. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Radioelectronics and Telecommunications*. No. 885. P. 147–154.
8. Ploshchyk Anna, Politskyi Ruslan, Haliuk Serhii. Analysis of Antenna System S-Parameters in Wireless Communication Networks Using HFSS: Role and Significance in Wi-Fi and 5G. P. 560–563. 2024. <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755706>.
9. Politskyi R., Ploshchyk A. Modeling and analysis of parameters and characteristics of broadband antenna devices in Wi-Fi, 5G and IoT communication systems. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*. No. 6, Vol. 1. 2024 (337). <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-31>.
10. Zhang Tingting, Sun Xuehong. A flaring planar dipole array antenna. *Proceedings Volume 13513, The International Conference Optoelectronic Information and Optical Engineering (OIOE2024)*. 135132H (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3045719>.
11. Josep M. Jornet, Edward W. Knightly, Daniel M. Mittleman. Wireless communications sensing and security above 100 GHz. *Nature Communications*. 2023. 14:841. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36621-x>.