

УДК 621.396.67

А.О. СЕМЕНОВ, А.В. КРИСТОФОРОВ

СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНАРНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ПАТЧ-АНТЕН ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ ЗАСОБІВ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Анотація. У роботі здійснено синтез та модельне дослідження планарної антенної решітки на основі патч-антен для застосування у бездротових засобах інформаційно-вимірювальних систем. Було аналізовано актуальні тенденції розвитку мікросмужкових патч-антен, розглянуто їх конструктивні варіанти, підходи до мініятуризації та принципи формування антенних решіток для бездротових засобів інформаційно-вимірювальних систем. Синтезовано та модельно досліджено одиничний елемент патч-антени на робочу частоту 2,4 ГГц. Сформульовано вимоги до планарної антенної решітки бездротових засобів інформаційно-вимірювальних систем і визначено ключові обмеження, пов'язані з діапазоном робочих частот, ефективністю, габаритами та електромагнітною сумісністю з іншими вузлами засобів. Запропоновано варіант компактної планарної антенної решітки, розроблено тривимірну модель патч-елемента та структуру її живлення. Чисельне дослідження виконано із застосуванням ANSYS Student 2025. У статті представлено результати синтезу та моделювання планарної антенної решітки патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів, розрахованої для роботи на частоті 2,4 ГГц. Отримано високий коефіцієнт підсилення 22,44 дБі та сформовано гостроспрямовану діаграму випромінювання з мінімальними бічними пелюстками, що забезпечує ефективну передачу сигналу. Дослідження показали робочу смугу пропускання близько 33 МГц та стабільність характеристик у межах цієї смуги. Підтверджено належне узгодження імпедансу (втрати на відбиття менше -10 дБ), що свідчить про високу ефективність передачі потужності.

Ключові слова: бездротовий засіб, інформаційно-вимірювальна система, патч-антена, планарна антена решітка, комп'ютерне моделювання, ANSYS Student.

Abstract. This paper presents the synthesis and modelling of a planar antenna array based on patch antennas for use in wireless information and measurement systems. Current trends in the development of microstrip patch antennas have been analyzed, their design variants examined, and approaches to miniaturisation and principles for forming antenna arrays for wireless information and measurement systems discussed. A single patch antenna element for an operating frequency of 2.4 GHz was synthesized and modeled. Requirements for the planar antenna array of wireless information and measurement systems are formulated, and key constraints related to the operating frequency range, efficiency, dimensions, and electromagnetic compatibility with other system components are identified. A variant of a compact planar antenna array is proposed, and a three-dimensional model of the patch element and its feeding structure has been developed. Numerical analysis was performed using ANSYS Student 2025. This paper presents the results of the design and modelling of an 8×8 patch antenna array with coaxial feeders, designed to operate at a frequency of 2.4 GHz. A high gain of 22.44 dBi was achieved, and a narrow-beam radiation pattern with minimal side lobes was formed, ensuring efficient signal transmission. Studies have shown an operating bandwidth of approximately 33 MHz and stable performance within this band. Proper impedance matching has been confirmed (reflection losses less than -10 dB), indicating high power transmission efficiency.

Keywords: wireless device, information and measurement system, patch antenna, planar array antenna, computer simulation, ANSYS Student.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-347-357

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1. ВСТУП

Сучасні бездротові технології охоплюють широкий спектр пристроїв і систем, причому їх поширення продовжує зростати [1]. Бездротові технології в інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) використовуються для передачі даних від датчиків до пристроїв обробки без фізичного підключення (кабелів) [2]. Це уможливило реалізувати дистанційний моніторинг, зменшити потребу у фізичному доступі до об'єктів та будувати компактні автономні мережі. На сучасному етапі розвитку ІВС спостерігається широке використання технологій Wi-Fi, LTE/5G, LoRaWAN та Zigbee у мобільних вимірювальних комплексах для оперативного збору, обробки та передачі даних у реальному часі [3, 4]. Ключовим елементом бездротових засобів ІВС є антена, від характеристик якої значною мірою залежить ефективність функціонування всієї системи [5]. Саме тому розроблення антенних структур потребує ретельного підходу з урахуванням вимог до робочих параметрів і умов експлуатації ІВС.

Серед різноманіття антенних рішень особливе місце посідають друковані антени, що набули широкого застосування завдяки компактності, низькому профілю та сумісності з інтегральною електронікою [6-8]. Найбільш поширеним їх різновидом є мікросмужкові патч-антени, які характеризуються простотою виготовлення та зручністю інтеграції в сучасні пристрої [6-8]. Водночас класичні конструкції патч-антен мають розміри порядку половини довжини хвилі, що ускладнює їх використання в мініатюрних системах [9]. У зв'язку з цим актуальним є розвиток підходів до зменшення габаритів таких антен, зокрема шляхом модифікації геометрії, застосування структурних неоднорідностей, короткозамкнених елементів або використання спеціальних матеріалів [9].

Планарні патч-антени використовуються не тільки як окремі елементи, але й дуже широко застосовуються в антенних решітках [10-12]. На сьогоднішній день антенні решітки мають широке поширення та використовуються для синтезу необхідної форми діаграми спрямованості, що не може бути досягнута за допомогою одного випромінювального елемента. Крім того, планарні антенні решітки використовуються для електронно керованого сканування радіопромінем, збільшення коефіцієнта спрямованої дії і виконання різних інших функцій, які було б складно виконати за допомогою одного випромінювального елемента.

У загальновідомій теорії патч-антен широко висвітлені відомості про їх класичну конструкцію у вигляді прямокутного патчу з мікросмужковою лінією живлення [13]. У той же час інші типи живлення випромінюваної поверхні патч антен, зокрема коаксіальним кабелем, мало оприлюднені. Тому метою цієї роботи є розроблення та моделювання планарної антенної решітки патч-антен з 8×8 елементів з коаксіальним живленням елементів.

2. МЕТОД ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Фундаментальний принцип прямокутних планарних патч-антен полягає в їхній простій, але ефективній структурі, яка складається з провідного прямокутного патча, розміщеного на діелектричній підкладці, із заземлювальною площиною під ним [13]. Така конструкція забезпечує ефективну передачу та прийом електромагнітних хвиль на резонансних частотах [13]. Таке поєднання простоти та ефективності гарантує широке використання цих антен у різних галузях, включаючи мобільні пристрої, Wi-Fi маршрутизатори та системи Інтернету речей, особливо на поширених частотах, таких як 2,4 ГГц [2].

Працюючи на частоті 2,4 ГГц, прямокутні патч-антени оптимізовані для широко використовуваних стандартів бездротового зв'язку, включаючи Wi-Fi та Bluetooth. Цей діапазон частот пропонує хороший баланс між дальністю та швидкістю передачі даних, що робить його ідеальним для внутрішніх та зовнішніх бездротових мереж. Конструкція антени на цій частоті забезпечує стабільний та сильний сигнал, що має вирішальне значення для підтримки надійних з'єднань. Діапазон 2,4 ГГц також має відносно низьку сприйнятливості до перешкод та інтерференції порівняно з вищими частотами, що підвищує стійкість бездротового зв'язку. Як результат, патч-антени, розроблені для 2,4 ГГц, є популярним вибором для покращення бездротового покриття та зв'язку в різних застосуваннях [2, 4].

Серед помітних переваг патч-антен є їхній високий коефіцієнт підсилення, простота виготовлення та сумісність з кількома режимами поляризації [13]. Зокрема, ці антени можуть підтримувати правосторонню кругову поляризацію (RHCP) та лівосторонню кругову поляризацію (LHCP), що забезпечує гнучкість для різних налаштувань зв'язку [13]. Крім того, їхні спрямовані діаграми випромінювання забезпечують сфокусовану передачу сигналу, що покращує дальність та зменшує інтерференцію [2]. Компактний розмір та низький профіль прямокутних патч-антен також сприяють їхній універсальності, дозволяючи компакту інтеграцію в пристрої або монтажні конструкції.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Загалом, ці характеристики роблять патч-антени дуже вигідними для розширення можливостей бездротового зв'язку, зберігаючи при цьому простоту використання та встановлення. На рисунку 1 показані зовнішній вигляд і основні конструктивні параметри планарної патч-антени [13].

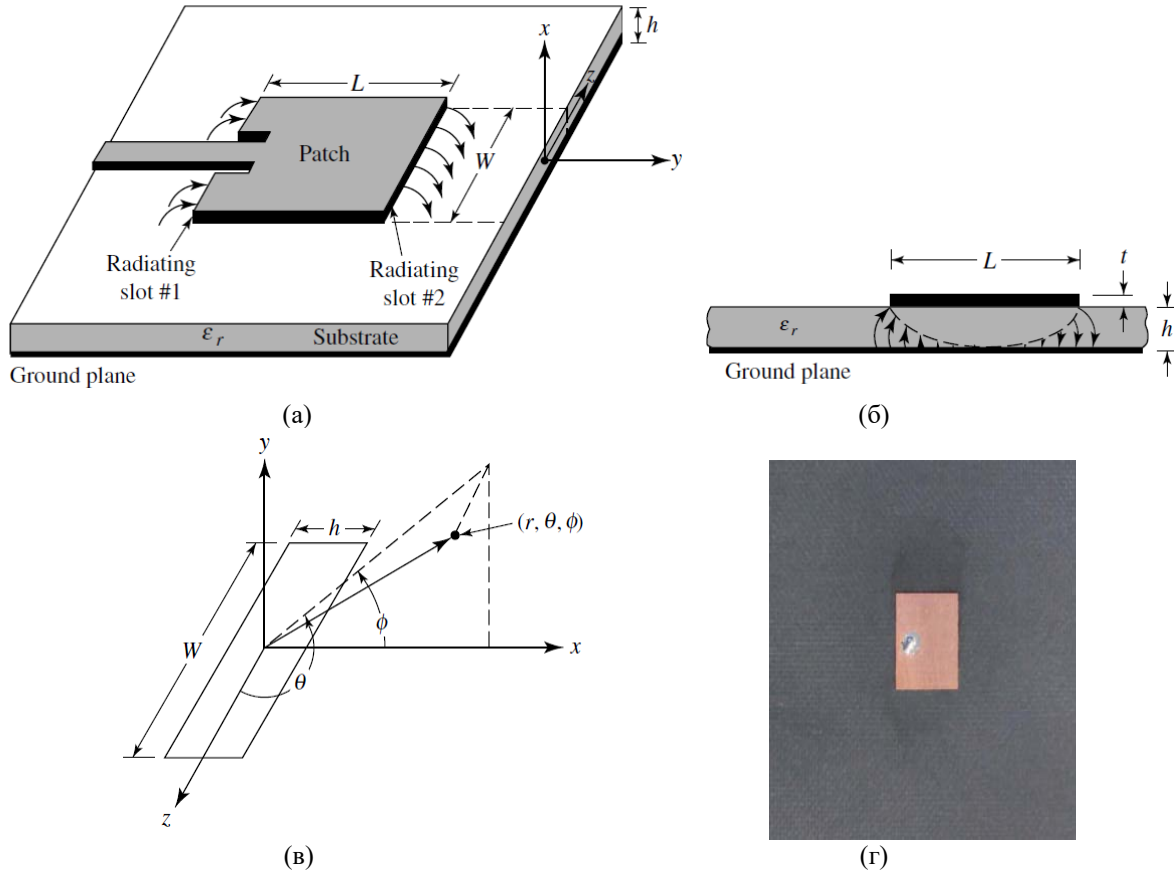


Рисунок 1 – Планарна патч-антена: (а) зовнішній вигляд планарної патч-антени; (б) вигляд збоку; (в) система координат для кожної випромінюючої щілини; (г) фото прямокутної патч-антени з коаксимальним фідером [13]

Для ефективного роботи планарної патч-антени її геометричні розміри повинні задовольняти таким співвідношенням [9, 13]

$$\begin{cases} \frac{\lambda_0}{3} < L < \frac{\lambda_0}{2}, \\ 0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0, \\ 2.2 \leq \varepsilon_r \leq 12. \end{cases} \quad (1)$$

Ширина W планарної патч-антени має бути правильно обрана, щоб забезпечити на резонансній частоті необхідний хвильовий опір [9, 13]

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_o \varepsilon_o}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}. \quad (2)$$

Ефективна діелектрична проникність підкладки оцінюється за співвідношенням [9, 13]

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}. \quad (3)$$

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET,
INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Ефективна довжина планарної патч-антени з урахуванням ефекту «облямування»

$$L_{eff} = L + \Delta L, \quad (4)$$

де величина «подовження» [9, 13]

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}. \quad (5)$$

Рівняння резонансної частоти для основної моди планарної патч-антени [9, 13]

$$f_{r_{010}} = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{c_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}. \quad (6)$$

З урахуванням ефективної довжини планарної патч-антени, її резонансна частота [13]

$$f_{rc_{010}} = \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = q \frac{c_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (7)$$

де [9, 13]
$$q = \frac{f_{rc_{010}}}{f_{r_{010}}}.$$

Провідність і вхідний опір планарної патч-антени [9, 13]

$$Y_1 = G_1 + jB_1, \quad (8)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10},$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - 0.636 \ln(k_0 h) \right], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10},$$

де [9, 13]
$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}.$$

Рівняння діаграми випромінювання планарної патч-антени [9, 13]:

- у просторі

$$f(\theta, \varphi) = \frac{\sin \left[\frac{kW}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi) \right]}{\frac{kW}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)} \cos \left(\frac{kL}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) \right), \quad (9)$$

- у площині E ($\varphi = 0^\circ$)

$$F_E(\theta) = \cos \left(\frac{kL}{2} \sin(\theta) \right), \quad (10)$$

у площині H ($\varphi = 90^\circ$)

$$F_H(\theta) = \cos(\theta) \frac{\sin \left(\frac{kW}{2} \sin(\theta) \right)}{\frac{kW}{2} \sin(\theta)}. \quad (11)$$

Коефіцієнт спрямованої дії планарної патч-антени при ($k_0 h \ll 1$) [9, 13]

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}}, \quad (12)$$

$$U_{\max} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0} \right)^2, \quad (13)$$

$$P_{\text{rad}} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \sin^3(\theta) d\theta. \quad (14)$$

Забезпечення ефективної передачі потужності від коаксіального кабелю до патч-антени передбачає ретельне проектування лінії живлення та правильне розміщення точки живлення (рис. 1,г). Розміщення точки живлення вздовж патча впливає на вхідний імпеданс, а також на смугу пропускання та коефіцієнт підсилення антени [13]. Для прямокутного планарного патча, що працює на частоті 2,4 ГГц, точка живлення зазвичай розташовується поблизу центру або трохи зміщена для досягнення бажаного узгодження імпедансу [13]. Використання високоякісних SMA-роз'ємів, зокрема що мають коефіцієнт підсилення 9,5 дБ, може сприяти стабільному з'єднанні з низькими втратами. Крім того, підтримка постійного імпедансу по всій лінії живлення, уникнення різких вигинів кабелю та забезпечення щільного з'єднання роз'ємів сприяють мінімальному відбиттю сигналу та максимальній передачі потужності, що призводить до ефективної та надійної роботи антенної системи.

Для практичної реалізації розробники часто використовують комбінацію інструментів моделювання та емпіричних налаштувань, особливо при роботі з планарними патч-антенами зі специфічними розмірами та діелектричними властивостями [6]. Досягнення гарного узгодження гарантує, що більша частина мікрохвильової потужності від коаксіального кабелю випромінюється ефективно, тим самим покращуючи силу сигналу та стабільність у цільовому діапазоні частот [4, 9].

Концепції антенних решіток формують основу для проектування складних систем бездротового зв'язку, дозволяючи покращити силу сигналу, спрямованість та можливості формування променя [14]. По суті, антенна решітка складається з кількох окремих випромінювальних елементів, розташованих у певній геометричній конфігурації, які працюють разом для створення сфокусованої та підсиленої діаграми спрямованості електромагнітної хвилі [13]. Така колективна поведінка дозволяє точно контролювати діаграму спрямованості шляхом регулювання фази та амплітуди, тим самим покращуючи загальну продуктивність системи. Зокрема, фазовані решіткові решітки використовують конструктивну та деструктивну інтерференцію для електронного керування променями без фізичного переміщення антен, що має вирішальне значення для застосувань, що потребують швидкого керування променем та високого коефіцієнта підсилення [14].

Перевага антенних решіток з 8×8 елементів полягає в їхній здатності досягати високої спрямованості та коефіцієнта підсилення в компактному форм-факторі, що робить їх ідеальними для сучасних бездротових застосувань [15]. Конфігурація 8×8 забезпечує суттєве збільшення випромінюваної потужності та керування променем порівняно з меншими решітками, сприяючи покращенню якості сигналу та покриття. Ця структура ефективно балансує складність та продуктивність, забезпечуючи зручне формування та керування променем.

Вибір інструментів електромагнітного моделювання має вирішальне значення для точного моделювання решітки патч-антени 8×8. Стандартне програмне забезпечення, таке як CST Microwave Studio, Ansys HFSS та FEKO, зазвичай використовується завдяки своїм розширеним можливостям обробки складних геометрій антен та властивостей матеріалів. Ці інструменти дозволяють проводити точний аналіз електромагнітної поведінки, включаючи такі параметри, як втрати на відбиття, діаграми спрямованості та коефіцієнти посилення. До того ж, вони сприяють моделюванню ефектів взаємного зв'язку елементів решітки.

3. СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ОДИНИЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ПАТЧ-АНТЕНИ

У роботі було синтезовано одиничний елемент патч-антени на частоту 2,4 ГГц в програмі Ansys Student 2025 із застосуванням засобу Antenna Toolkit (рис. 2). Діаграми спрямованості синтезованого одиничного елемента патч-антени на частоту 2,4 ГГц у просторі та в головних площинах випромінювання показані відповідно на рис. 3-4.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

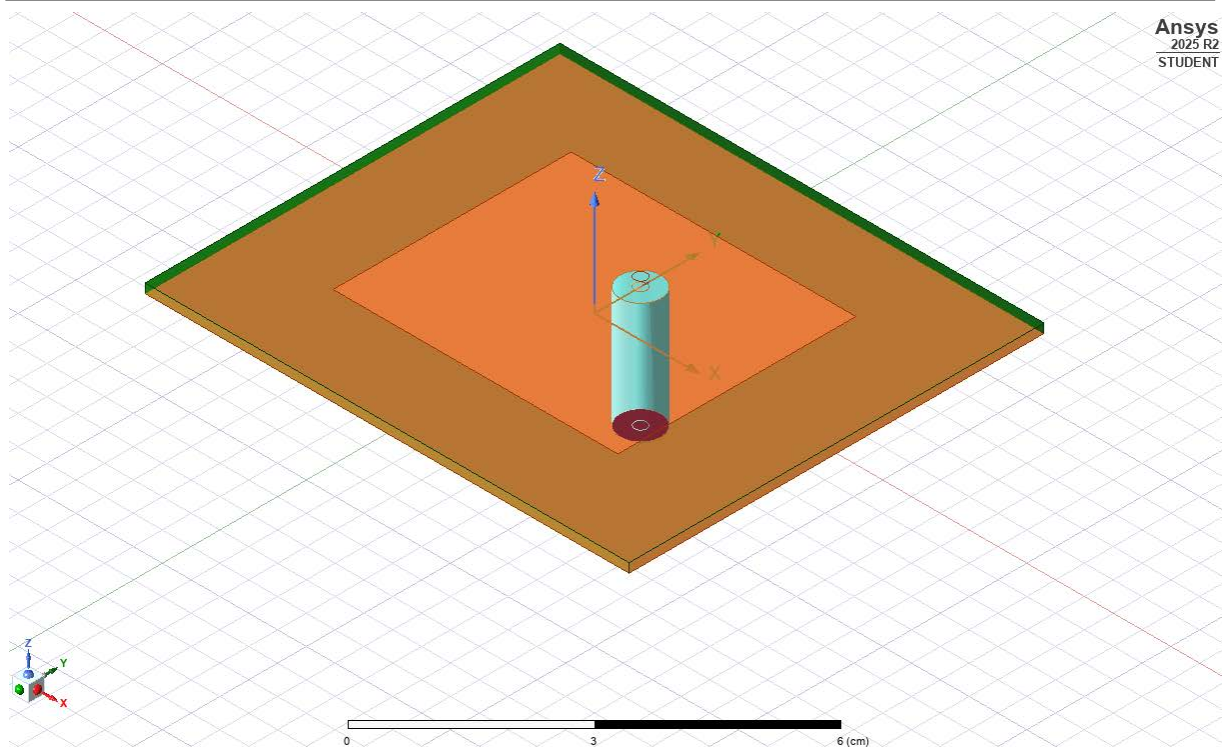


Рисунок 2 – Вигляд геометрії синтезованого одиничного елемента патч-антени на частоту 2,4 ГГц в програмі Ansys Student 2025 із застосуванням засобу Antenna Toolkit

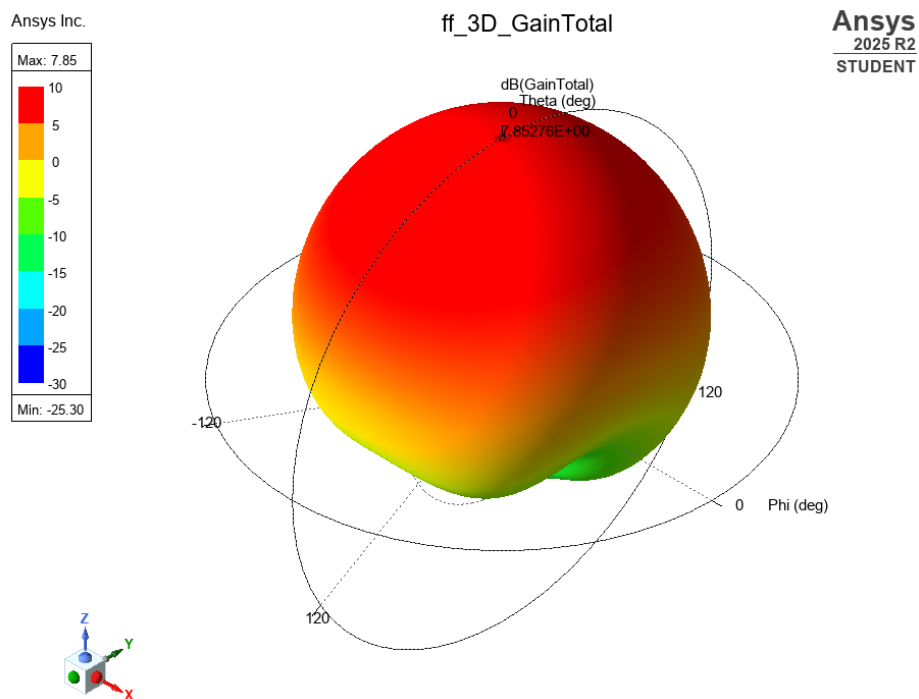


Рисунок 3 – Просторова діаграма спрямованості синтезованого одиничного елемента патч-антени на частоту 2,4 ГГц

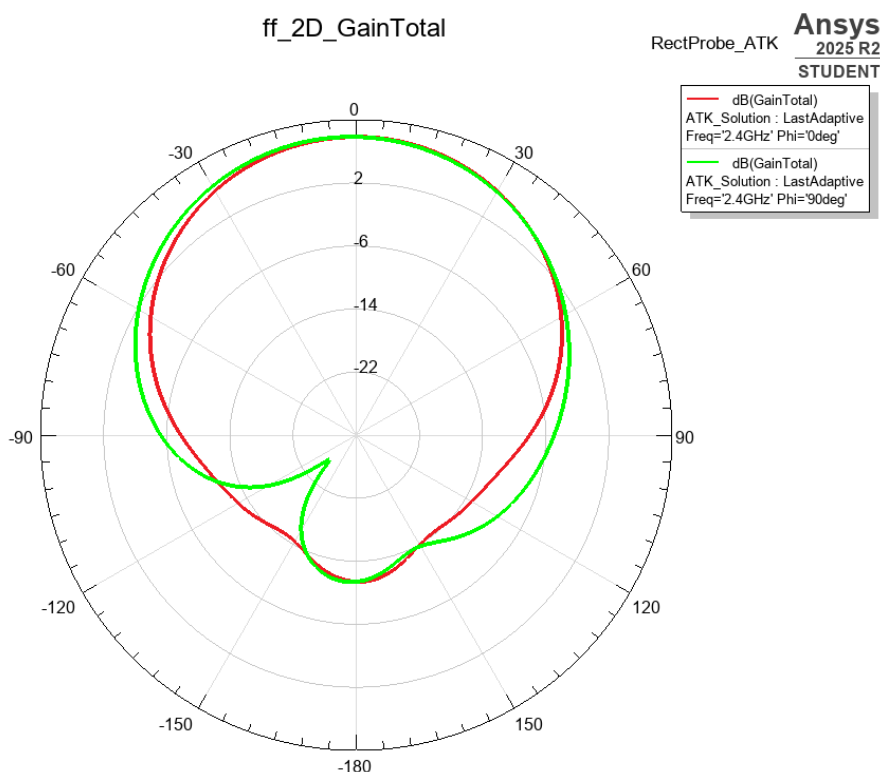


Рисунок 4 – Діаграми спрямованості синтезованого одиничного елемента патч-антени на частоту 2,4 ГГц у вертикальних площинах $\phi = 0^\circ$ (червона лінія) та $\phi = 90^\circ$ (зелена лінія)

Як видно з рис. 3-4 на частоті 2,4 ГГц коефіцієнт підсилення планарної патч-антени складає 7,85 дБі, а ширина діаграми випромінювання по рівню -3дБ складає $122,7^\circ$. Також в програмі Ansys Student 2025 були досліджені частотні характеристики планарної патч-антени. По рівню -10 дБ коефіцієнта відбиття робочий діапазон частот 2,403 ГГц – 2,346 ГГц при центральній частоті 2,3152 ГГц, на якій значення коефіцієнта відбиття становить -14,2051 дБ при узгодження на хвильовий опір 50 Ом коаксіального кабеля.

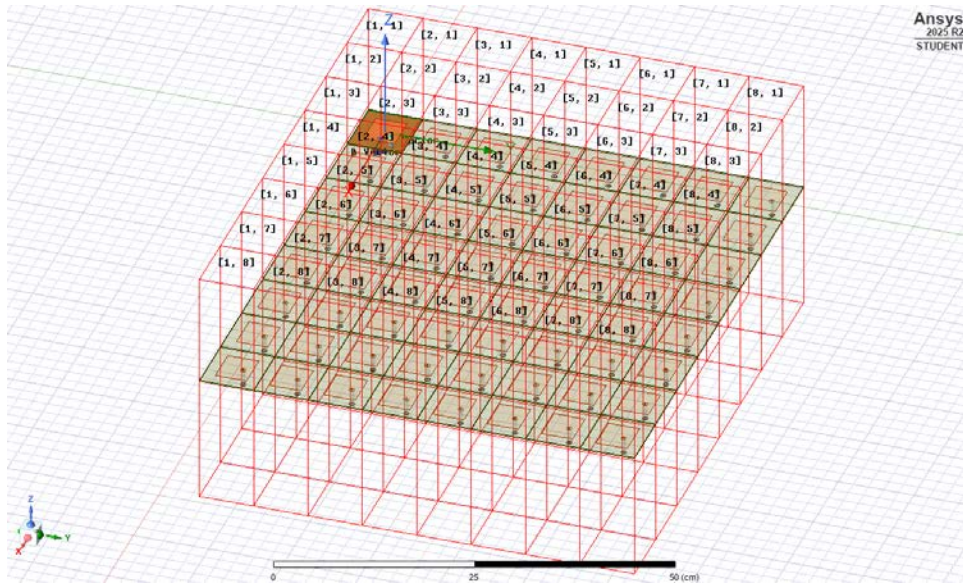
4. СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНАРНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ З 8×8 ПАТЧ-АНТЕН

Комп'ютерний синтез планарної решітки з патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів (рис. 5,а) був виконаний із застосуванням методики базової теорії антенних решіток [14] з використанням програмного забезпечення ANSYS HFSS [15].

Граничні умови та налаштування параметрів є важливими для надійних результатів моделювання. Правильне визначення граничних умов гарантує, що середовище моделювання точно імітує реальні умови (рис. 5,б). Налаштування параметрів, включаючи діапазон частот, щільність сітки та критерії збіжності, були ретельно підібрані для забезпечення високої точності отриманих результатів (рис. 5,б). При моделюванні на частоті 2,4 ГГц були використані рекомендації [14-15] для врахування складних електромагнітних взаємодій у кожному елементі патча та мережі живлення. Ці конфігурації безпосередньо впливають на точність ключових показників продуктивності, таких як узгодження імпедансу та ефективність випромінювання [15].

При моделюванні були використані вбудовані в Ansys Student методи оптимізації для підвищення ефективності антенної решітки за рахунок підвищення коефіцієнтів підсилення та спрямованої дії шляхом узгодження імпедансів у робочій смузі частот. Для синтезованої планарної антенної решітки з патч-антен 8×8 елементів було досягнуто рівномірні діаграми спрямованості та мінімізовані бічні пелюстки, зберігаючи узгодження імпедансу на частоті 2,4 ГГц. Така ретельна оптимізація гарантує, що синтезована планарна антенна решітка з 8×8 патч-антен надійно працюватиме в практичних застосуваннях [15].

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ



(a)

[MicrostripPatch_antenna_2.4GHz_array] Edit post process sources

Spectral Fields

	Source	Type	Magnitude	Unit	Phase	Unit
1	Antenna_array[1.1]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 0*ScanPhaseShiftB)	
2	Antenna_array[1.2]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 1*ScanPhaseShiftB)	
3	Antenna_array[1.3]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 2*ScanPhaseShiftB)	
4	Antenna_array[1.4]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 3*ScanPhaseShiftB)	
5	Antenna_array[1.5]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 4*ScanPhaseShiftB)	
6	Antenna_array[1.6]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 5*ScanPhaseShiftB)	
7	Antenna_array[1.7]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 6*ScanPhaseShiftB)	
8	Antenna_array[1.8]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (0*ScanPhaseShiftA + 7*ScanPhaseShiftB)	
9	Antenna_array[2.1]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 0*ScanPhaseShiftB)	
10	Antenna_array[2.2]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 1*ScanPhaseShiftB)	
11	Antenna_array[2.3]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 2*ScanPhaseShiftB)	
12	Antenna_array[2.4]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 3*ScanPhaseShiftB)	
13	Antenna_array[2.5]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 4*ScanPhaseShiftB)	
14	Antenna_array[2.6]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 5*ScanPhaseShiftB)	
15	Antenna_array[2.7]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 6*ScanPhaseShiftB)	
16	Antenna_array[2.8]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (1*ScanPhaseShiftA + 7*ScanPhaseShiftB)	
17	Antenna_array[3.1]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (2*ScanPhaseShiftA + 0*ScanPhaseShiftB)	
18	Antenna_array[3.2]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (2*ScanPhaseShiftA + 1*ScanPhaseShiftB)	
19	Antenna_array[3.3]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (2*ScanPhaseShiftA + 2*ScanPhaseShiftB)	
20	Antenna_array[3.4]coax_pin_T1	Port	ScanMag1*1		ScanPhase 1 + (2*ScanPhaseShiftA + 3*ScanPhaseShiftB)	

(б)

Рисунок 5 – Проект синтезованої планарної решітки з патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів в програмі Ansys Student 2025: (а) загальний вигляд; (б) опис параметрів елементів

Характеристики діаграми спрямованості є важливими для розуміння того, як антенна решітка розподіляє енергію в просторі, впливаючи на покриття та зменшення перешкод. На рис. 6 наведена 3D-діаграма коефіцієнта спрямованої дії планарної антенної решітки патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів. Модельовані діаграми спрямованості виявили високо спрямований головний пелюсток, що супроводжується відносно низьким рівнем бічної пелюстки. Як видно з рис. 6 синтезована планарна антенна решітки патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів має гостро спрямовану діаграму випромінювання. Коефіцієнт спрямованої дії становить 143,08 разів, а величина коефіцієнта підсилення складає 22,44 дБі. Така гостро спрямована поведінка є важливою для збільшення відстані зв'язку та мінімізації перешкод із сусідніми бездротовими пристроями. Головна пелюстка діаграми спрямованості має симетричну форму, що вказує на рівномірні характеристики випромінювання навколо вертикальної осі. Детальний аналіз цих діаграм спрямованості підтверджує, що конструкція антенної решітки ефективно формує розподіл випромінювання відповідно до вимог застосування бездротових засобів ІВС.

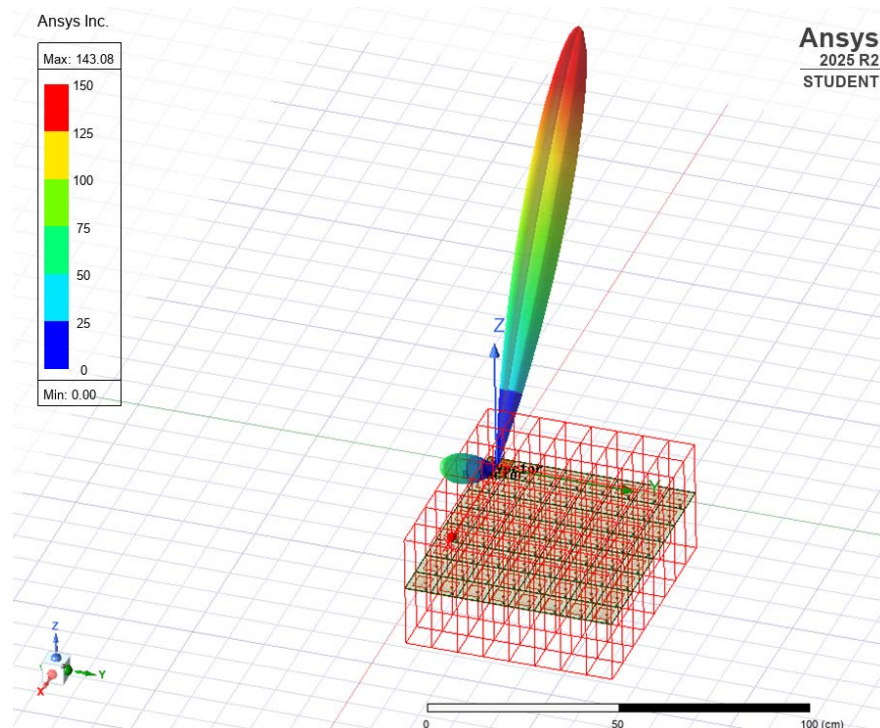


Рисунок 6 – 3D-діаграма коефіцієнта спрямованої дії планарної антенної решітки патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів

Також були модельно досліджені хвильові характеристики планарної решітки з патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів в програмі Ansys Student 2025. Діапазон робочих частот по рівню коефіцієнта відбиття -10 дБ становить 2,404 ГГц – 2,437 ГГц, а значення коефіцієнта відбиття при узгодженні антенної решітки на хвильовий опір 50 Ом на середній частоті 2,4212 ГГц становить -18,6928 дБ. Узгодження імпедансу та втрати на відбиття є критичними факторами для забезпечення максимальної передачі потужності від джерела живлення до елементів антени, тим самим підвищуючи загальну ефективність антенної решітки. Результати моделювання показали втрати на відбиття менше -10 дБ по всій робочій смузі пропускання, що вказує на мінімальне відбиття та відмінне узгодження імпедансу на частоті 2,42 ГГц. Досягнення такого рівня узгодження передбачало точне налаштування геометрії коаксіального живлення та елементів, що допомогло зменшити коефіцієнт стоячої хвилі та втрати потужності. Правильне узгодження імпедансу особливо важливе в конфігураціях антенної решітки, де узгодженість фази та амплітуди між елементами безпосередньо впливає на діаграму спрямованості та коефіцієнт підсилення [14]. Результати досліджень демонструють високий ступінь узгодження, що підтверджує якість проектування та оптимізації параметрів антенної решітки із використанням решітки з патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів в програмі Ansys.

5. ВИСНОВКИ

Розробка та моделювання планарної антенної решітки патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів на частоті 2,4 ГГц дали задовільні результати, продемонструвавши високі значення коефіцієнтів підсилення та спрямованої дії, що уможливило сформувати гостроспрямовану діаграму випромінювання. Модельоване значення коефіцієнта підсилення решітки становить 22,44 дБі. Це свідчить про суттєве збільшення випромінюваної потужності в напрямку головного пелюстка на відміну від одиночного елемента планарної патч-антени, що має вирішальне значення для покращення якості зв'язку в бездротових системах. Аналіз пропускну здатності показав робочий діапазон приблизно 33 МГц, що забезпечує достатню ширину смуги частот для практичного застосування в засобах ІВС. Аналіз діаграми спрямованості підкреслив гостро спрямований характер синтезованої антенної решітки з чітко визначеним головним пелюстком та мінімальними бічними пелюстками. При цьому,

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

характеристики випромінювання є стабільними в робочій смузі пропускання, що є важливим для підтримки стабільної роботи в різних умовах. Завдяки оптимізації геометрії антенної решітки та мережі живлення, конструкція досягла збалансованої діаграми спрямованості, яка може бути адаптована для різноманітних бездротових застосувань ІВС.

Вимірювання узгодження імпедансу та втрат на відбиття підтвердили, що антенна решітка підтримувала хороше узгодження імпедансу на частоті 2,4 ГГц, зі значеннями втрат на відбиття, що перевищують -10 дБ у робочому діапазоні частот. Це вказує на мінімальне відбиття та високу ефективність передачі потужності від лінії живлення до елементів антени. Правильне узгодження імпедансу зменшує втрати сигналу та підвищує загальну ефективність системи, що є критично важливим у конфігураціях антенної решітки, де задіяно багато елементів випромінювання. Результати підкреслюють важливість точного проектування мережі живлення та методів оптимізації імпедансу для досягнення оптимальної продуктивності. У майбутніх дослідженнях будуть вдосконалені компоненти узгодження та методи адаптивного налаштування для електронного керування променем з подальшим підвищенням ефективності випромінювання та пропускну здатності планарної антенної решітки патч-антен із коаксіальними фідерами розмірністю 8×8 елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Saeed, M. A., & Nwajana, A. O. (2024). A review of beamforming microstrip patch antenna array for future 5G/6G networks. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1288171>
2. Sudhakar, K., Harshita, B., Indumathi, R., Infant Bena, B., Janani, B. C., & Meha, T. (2025). Design and Simulation of a 2x2 Microstrip Patch Antenna Array for a Wireless Communication System. In *2025 6th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 25-27 June 2025, Coimbatore, India, pp. 253–257. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icirca65293.2025.11089900>
3. L. Goshu, A., T. Gameda, M., & A. Fante, K. (2022). Planar Microstrip Patch Antenna Arrays with Semi-elliptical Slotted Patch and ground Structure for 5G Broadband Communication Systems. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2069069>
4. Semenov, A. O., Semenova, O. O., Pinaiev, B. O., Kulias, R. O., & Shpylovyi, O. O. (2022). Flexible two-band lte antenna for radio-frequency access technologies for wearable devices of wireless info-communication and sensor networks. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, (4), 32–38. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/07>
5. Yeo, J., & Lee, J.-I. (2023). Gain Enhancement of Microstrip Patch Array Antennas Using Two Metallic Plates for 24 GHz Radar Applications. *Electronics*, 12(7), 1512. <https://doi.org/10.3390/electronics12071512>
6. LAI, Q., & PAN, Y. (2022). A Wideband Self-Decoupled Microstrip Patch Antenna Array Using Characteristic Modes of Ground Plane. *Chinese Journal of Electronics*, 31(6), 1161–1172. <https://doi.org/10.1049/cje.2022.00.249>
7. Tiwari, R., Sharma, R., & Dubey, R. (2023). 2X2 & 4X4 dumbbell shape microstrip patch antenna array design for 5G Wi-Fi communication application. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.348>
8. Asaduddin, M., Seif Shah, S., & Asim Siddiqui, M. (2023). Design of Microstrip Patch Antenna Array. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*, 13(3), 39–48. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2023.03.04>
9. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kulias, R., & Shpylovyi, O. (2022). Development of a flexible antenna-wristband for wearable wrist-worn infocommunication devices of the LTE standard. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(65)), 20–26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.261718>
10. Byford, J. A., Park, K. Y., Chahal, P., & Rothwell, E. J. (2015). Frequency reconfigurable patch antenna array. *Electronics Letters*, 51(21), 1628–1630. <https://doi.org/10.1049/el.2015.1771>
11. Nguyen, T., & Karacolak, T. (2019). Planar patch antenna system with high isolation for full-duplex applications. *Electronics Letters*, 55(25), 1326–1329. <https://doi.org/10.1049/el.2019.3059>
12. Sadeghi-Marasht, S., Rahimi, M. R., Sharawi, M. S., & Zhu, A. (2022). A single-layer circularly polarized planar lens antenna at millimetre-wave. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 16(10), 668–678. <https://doi.org/10.1049/mia2.12281>

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

13. Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: Analysis and design (4th ed.). John Wiley & Sons. 1095 p.
14. Basics of Antenna Arrays. URL: <https://innovationspace.ansys.com/product/basics-of-antenna-arrays/>
15. Designing a Microstrip Patch Antenna and 2D Array in Ansys HFSS Software. URL: <https://www.ansys.com/academic/educators/education-resources/design-and-simulation-of-microstrip-patch-antenna-and-2d-array-in-ansys-hfss>

Дата надходження: 5.02.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 1.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

*Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)*

СЕМЕНОВ АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ — д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Україна, ***e-mail:*** semenov.a.o@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9580-6602>

КРИСТОФОРОВ АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ — аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Україна, ***e-mail:*** andrew199910kr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0616-667X>

Andrii SEMENOV, Andrii KRYSTOFOROV

**SYNTHESIS AND MODELLING OF A PLANAR PATCH ANTENNA ARRAY FOR WIRELESS
DEVICE OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS**

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine