

УДК 621.396.67

ПАТЧ-АНТЕНИ НА ОСНОВІ МІКРО QR-КОДІВ**В. СЛЮСАР¹, І. СЛЮСАРЬ², С. ШЕЛЕГ³**¹*Центральний науково-дослідний інститут озброє та військової техніки Збройних Сил України
Україна, Київ*²*Полтавський державний аграрний університет
Україна, Полтава*³*ENIT, Inc.
США, Арізона, Скоттсдейл*

Анотація: У статті запропоновано новий тип широкосмугових патч-антен на основі мікро QR-кодів з інтегрованою метаматеріальною коміркою в якості маркера. У цьому дослідженні розглянуто кілька варіантів конструкції, які отримані шляхом зміни параметрів метаматеріальної комірки. Для їх аналізу використано методи чисельного моделювання програми Ansys EM Suite, внаслідок складності опису взаємодії антен неевклідової геометрії з радіохвилями. Оцінка та порівняння запропонованих антен проводилась за такими характеристиками: амплітудно-частотна характеристика та коефіцієнт стоячої хвилі за напругою. Для розширення частотної смуги синтезованої антени застосовано розщеплений квадратний маркер, який є елементом мікро QR. Такий підхід дозволив розширити відносну ширину смуги пропускання відповідної друкованої антени до значення 1,7267 при безперервній смузі пропускання шириною 167,935 ГГц в діапазоні 13,29–181,225 ГГц. В цьому випадку, вирізи розщепленого квадратного маркера розташовані вздовж лінії, коаксіальної з лінією живлення, а виріз для зовнішнього «кільця» знаходиться знизу. Для синтезу мікро QR-коду використано слово «антена».

Ключові слова: амплітудно-частотна характеристика; Ansys HFSS; метаматеріал; мікро QR; патч-антена; джерело живлення; зворотні втрати; коефіцієнт стоячої хвилі за напругою; КСХН; SRR; розрізний кільцевий резонатор

1. ВСТУП

Розвиток систем зв'язку 6-го покоління (6G) базується на застосуванні нових підходів і технічних рішень. Подальша еволюція антенних систем з урахуванням тенденції розвитку 6G буде відбуватися за наступними напрямками [1]–[3]: збільшення кількості антенних елементів в антенній решітці в системах massive MIMO і super-massive MIMO (32×32 і т. д.); перехід на робочі частоти терагерцового діапазону, інтеграція декількох широкосмугових частотних діапазонів в одній антенній конструкції, в тому числі і терагерцового діапазону;

використання фотонних технологій та нейронних мереж для формування променя та обробки сигналів; поєднання функціональних можливостей РЛС та системи зв'язку для спостереження та керування безпілотними ройовими системами, такими як безпілотні повітряні апарати UAV (unmanned air vehicles), безпілотні наземні машини UGV (unmanned ground vehicles), безпілотні надводні апарати USV (unmanned surface vehicles).

Одним з підходів до створення систем 6G є використання інтелектуальних відбивних поверхонь IRS (intelligent reflective surfaces) [4]. IRS можна використовувати як інтелектуаль-

DOI: [10.20535/S002134702307004X](https://doi.org/10.20535/S002134702307004X)

© В. Слюсар, І. Слюсарь, С. Шелег, 2023

ний ретранслятор для декількох передавачів у складних системах стільникового зв'язку та радіолокації [5]. Водночас, розміщення IRS на стінах будівель та об'єктів громадського доступу, а також на предметах інтер'єру та обладнанні всередині приміщень дозволить розширити функціональні можливості IRS за рахунок створення різноманітних рекламних зображень з використанням світловідбиваючих елементів.

Зокрема, IRS пропонується використовувати як платформу для збору множини QR-кодів, що надають доступ до різних веб-сайтів, які містять рекламний контент. При цьому формування зображень QR-кодів може здійснюватися за принципом ієрархії, коли на достатній відстані візуально відтворюється один або декілька QR-кодів великого розміру, утворених масою менших за розміром QR-кодів. А ці менші, в свою чергу, можуть бути сформовані на основі QR-кодів, які будуть сприйматися лише в безпосередній близькості до поверхні IRS.

У випадках, коли однотипні QR-коди використовуються на різних рівнях ієрархій, фактично йдеться про фрактальний підхід, який можна формалізувати у вигляді матриці за допомогою кронекерового добутку матриць. Наприклад, якщо первинний QR-код представлений у вигляді матриці пікселів \mathbf{A} , то фрактальна система трьох ітерацій таких кодів може бути представлена наступним чином:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{A} \otimes \mathbf{A}, \quad (1)$$

де \otimes — символ операції кронекерового добутку.

При цьому кожен піксель великого зображення замінюється матрицею того ж QR-коду в межах одного пікселя. Ця ж процедура повторюється під час наступної ітерації.

Якщо для кожної ітерації використовується окремий код, то вираз (1) слід переформулювати наступним чином:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{B} \otimes \mathbf{C}. \quad (2)$$

Матриці \mathbf{A} , \mathbf{B} і \mathbf{C} можуть представляти не тільки різні закодовані фрагменти інформації в одному QR-коді, що пов'язані, наприклад, семантично, але й різні типи кодів: QR, мікро QR і так далі.

При переході на нижній рівень мікро QR-кодів для опису топологій пікселів можна використовувати проникаючий торцевий добуток матриць [6, 7]. Згідно з визначенням [6], проникаючий торцевий добуток ($p \times g$)-матриці \mathbf{A} та n -вимірного тензора \mathbf{B} , розгорнутого в блочну матрицю, що містить $p \times g$ блоків ($\mathbf{B} = [\mathbf{B}_n]$, $n > 1$), є матрицею виду:

$$\mathbf{A}[\circ]\mathbf{B} = [\mathbf{A} \circ \mathbf{B}_n], \quad (3)$$

де $\mathbf{A} \circ \mathbf{B}_n$ — добуток Адамара.

Якщо матриця \mathbf{A} представляє пікселі мікро QR-кодів на нижньому рівні, а блокова матриця \mathbf{B} представляє піксельні кластери мікро QR або QR-кодів на верхньому рівні, то результуюча топологія описується наступним чином:

$$\mathbf{A}[\circ]\mathbf{B} = \mathbf{A}[\circ] \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1G} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{P1} & B_{P2} & \cdots & B_{PG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \circ B_{11} & \mathbf{A} \circ B_{12} & \cdots & \mathbf{A} \circ B_{1G} \\ \mathbf{A} \circ B_{21} & \mathbf{A} \circ B_{22} & \cdots & \mathbf{A} \circ B_{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A} \circ B_{P1} & \mathbf{A} \circ B_{P2} & \cdots & \mathbf{A} \circ B_{PG} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В якості прикладу, нехай

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{111} & b_{121} & b_{112} & b_{122} & b_{113} & b_{123} \\ b_{211} & b_{221} & b_{212} & b_{222} & b_{213} & b_{223} \\ b_{311} & b_{321} & b_{312} & b_{322} & b_{313} & b_{323} \end{bmatrix},$$

тоді

$$\mathbf{A}[\circ]\mathbf{B} =$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} \cdot b_{111} & a_{12} \cdot b_{121} & a_{11} \cdot b_{112} & a_{12} \cdot b_{122} & a_{11} \cdot b_{113} & a_{12} \cdot b_{123} \\ a_{21} \cdot b_{211} & a_{22} \cdot b_{221} & a_{21} \cdot b_{212} & a_{22} \cdot b_{222} & a_{21} \cdot b_{213} & a_{22} \cdot b_{223} \\ a_{31} \cdot b_{311} & a_{32} \cdot b_{321} & a_{31} \cdot b_{312} & a_{32} \cdot b_{322} & a_{31} \cdot b_{313} & a_{32} \cdot b_{323} \end{bmatrix}.$$

Якщо в межах однієї і тієї ж фрактальної ітерації необхідно використовувати різні QR-коди, то для формалізації топології таких IRS потрібно застосувати блоковий матричний добуток Кронекера [8]. При цьому первинна матриця QR-коду розбивається на M модулів, кожен з яких множиться на відповідну матрицю наступної ітерації за допомогою прямого добутку Кронекера:

$$\begin{aligned} H &= [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_M][\otimes] \\ &[\otimes][B_1 \ B_2 \ \dots \ B_M][\otimes] \\ &[\otimes][C_1 \ C_2 \ \dots \ C_M], \end{aligned} \quad (5)$$

де $[\otimes]$ — символ операції блочного добутку Кронекера.

Можлива комбінація обох зазначених варіантів з монотипним заповненням пікселів в межах однієї ітерації та диверсифікованим варіантом на інших рівнях ієрархії, наприклад:

$$\begin{aligned} H &= ([A_1 \ A_2 \ \dots \ A_M] \otimes B)[\otimes] \\ &[\otimes][C_1 \ C_2 \ \dots \ C_M], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} H &= [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_M][\otimes] \\ &[\otimes][A_1 \ A_2 \ \dots \ A_M][\otimes] \\ &[\otimes][C_1 \ C_2 \ \dots \ C_M], \end{aligned} \quad (7)$$

і так далі.

Враховуючи, що IRS можуть бути як пасивними, так і активними, пропонується наносити на поверхню IRS QR-коди з струмопровідних матеріалів і таким чином створювати друковані антени у вигляді QR-коду.

Слід зазначити, що ідея застосування QR-кодів для топології антен не є новою. Наприклад, серед перших публікацій з цього приводу можна відзначити роботу [9]. Подальший розвиток цього напрямку стосовно друкованих антен представлений в роботах [10]–[14]. Зокрема, в [10] розглядався варіант антени з живленням, підведеним до одного з внутрішніх пікселів в тілі QR-коду. Таке рішення має обмежені можливості щодо розміщення антени, що перешкоджає отриманню рівня зворотних втрат менше -8 дБ, до того ж у дуже вузькому діапазоні частот.

Аналогічний підхід з внутрішньопіксельною комутацією живлення досліджено в [11]. При цьому авторам [11] вдалося отримати досить низькі значення зворотних втрат ($-21,48$ дБ) у вузькому частотному діапазоні на частоті 2,4 ГГц за рахунок грамотного вибору кодової фрази, а також оптимізації розташування з'єднувальних модулів у топології QR-коду з урахуванням 7-відсоткової корекції помилок при його декодуванні.

Робота [12] стала подальшим кроком у розвитку концепції оптимізації параметрів QR-антени з внутрішньопіксельним живленням на основі внесення навмисних спотворень в топології QR-коду. Відповідно до [12], звичайна антена RFID-мітки була інтегрована з топологією QR-коду, в результаті чого отримані зворотні втрати на рівні $-15,4$ дБ на резонансній частоті 2,45 ГГц, поряд з розширенням робочої смуги частот передачі з 2,3 до 3,08 ГГц.

Разом з тим, слід зазначити, що концепція введення навмисних спотворень в структуру QR-коду для оптимізації параметрів антени, запропонована в роботах [11], [12], має обмежені можливості щодо розширення їх смуги пропускання. Застосування зовнішніх по відношенню до топології QR-антен ліній живлен-

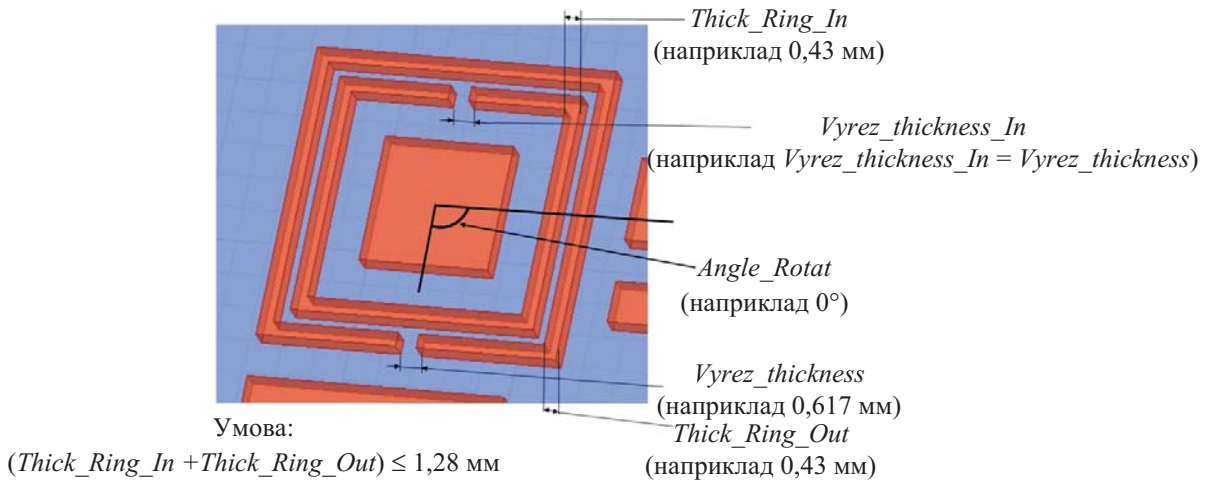


Рис. 1. Рамка SRR навколо еталонного квадратного шаблону мікро QR-коду.

ня надає більше ступенів свободи щодо отримання широкосмуговості.

Наприклад, в роботі [13] запропоновано варіант розміщення таких підвідних ліній у вигляді смужкової лінії поза контуром QR-коду, що виконує функцію зовнішнього резонатора, який дозволяє розширити робочу смугу антени. В контексті підходу, що розглядається в даній статті, заслуговує на увагу підключення смужкової лінії живлення на декілька пікселів зовнішнього контуру QR-коду [14].

Як зазначено раніше, мікро QR-коди можуть бути використані разом з QR-кодами для проектного синтезу друкованих антен у складі IRS. Потенційні варіанти топології таких антен запропоновані та досліджені в роботі [15]. Розглянемо подальший розвиток існуючих антенних рішень в рамках гіпотези, сформульованої в роботі [15], щодо доцільності використання метаматеріальних одиничних структурних елементів опорного сегмента мікро QR-коду.

Решта роботи структурована та містить кілька розділів, які допомагають читачам орієнтуватис у змісті. Розділ 2 опису підхід, застосований авторами для розробки і тестування друкованої конструкції антени. Сюди входить детальний опис програмного забезпечення Ansys EM Suite, використаного для створен-

ня конструкції, а також конкретні параметри і змінні, використані в моделі. У розділі 3 представлено результати дослідження, включаючи значення КСХН і зворотних втрат синтезованої антени, а також її діаграму спрямованості на частоті 25 ГГц. В розділі 4 автори провели порівняння отриманих результатів з попередніми дослідженнями та прокоментували наслідки своїх висновків. Наприкінці статті обговорюються основні результати дослідження, його обмеження та напрями подальших досліджень.

2. ЗАПРОПОНОВАНА КОНСТРУКЦІЯ ПАТЧ-АНТЕНИ НА ОСНОВІ МІКРО QR-КОДУ

Для проведення дослідження авторами в пакеті Ansys EM Suite [16] розроблена базова модель патч-антени на основі мікро QR-коду, що містить слово «antenna». Формування топології, що відповідає конкретному коду, виконано аналогічно [15] за допомогою сервісів [17], [18]. Вибір слова «антенна» дозволяє зберегти наступність у контексті результатів [15], а також виконати порівняння характеристик раніше синтезованих антен з їхніми новими топологіями.

Новизна запропонованого підходу полягає в тому, що в рамках зазначеної базової моделі

Таблиця 1. Параметри конструкції

Параметр	Змінна	Значення
Ширина внутрішнього кільця	Thick_Ring_In	0,43 мм
Ширина зовнішнього кільця	Thick_Ring_Out	0,43 мм
Ширина вирізу у внутрішньому кільці	Vyrez_thickness_In	0,617 мм
Ширина вирізу в зовнішньому кільці	Vyrez_thickness	0,617 мм
Кут_повороту	Angle_rotat	0 град

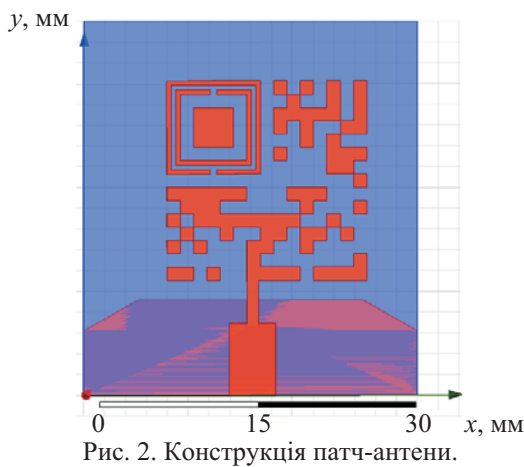


Рис. 2. Конструкція патч-антени.

використано елемент метаматеріалу у вигляді пари розрізаних квадратних рамок, які окреслюють еталонний квадрат QR-коду у лівому верхньому куті матриці мікрокоду (рис. 1). Це дозволило сформувати SRR-резонатор (split-ring resonator) [19]–[21]. При цьому ширину вирізу можна змінювати в межах SRR (використано змінні «Vyrez_thickness» (виріз) — в зовнішньому кільці, «Vyrez_thickness_In» (виріз) — у внутрішньому кільці). Всі змінні задано в мм. За замовчуванням, встановлено, що $Vyrez_thickness_In = Vyrez_thickness$. Орієнтація вирізу в SRR задається для зовнішнього кільця змінною $Angle_rotat$ (0; 90; 180; 270 градусів), а для внутрішнього кільця — змінною $Angle_rotat_In$ в межах стандартного набору аналогічних значень: 0; 90; 180; 270 градусів.

При цьому 0° відповідає розташуванню вирізу знизу зовнішнього і внутрішнього кільця, на осі, паралельній лінії живлення.

Ширина SRR-рамок в межах цієї моделі задається змінними: $Thick_Ring_In$; $Thick_Ring_Out$. При цьому головною вимогою тут є виконання умови:

$$(Thick_Ring_In + Thick_Ring_Out) \leq 1,28 \text{ мм.}$$

Це пов'язано із забезпеченням можливості декодування мікро QR-кодів у типових додатках для смартфонів. Замість стандартної ширини рамки еталонного квадратного шаблону (1 мм) встановлено ширину 1,28 мм, що пов'язано з масштабуванням мікро QR-коду для прив'язки його до результатів інших публікацій авторів [15].

Загальний вигляд запропонованої друкованої антени представлено на рис. 2. Виріз у зовнішньому кільці розташований знизу. Обидва вирізи розташовано вздовж лінії, паралельної з лінією живлення. Значення основних параметрів конструкції наведено в табл. 1.

Щодо параметрів лінії живлення та конфігурації екрану, для всіх розглянутих тут варіантів топології вони встановлені ідентичними до антен [15].

Модифікація кодової матриці (рис. 2) протестована на предмет можливості декодування сканером iPhone 11 Pro за умови зміни кольору всіх пікселів-елементів коду на чорний. При

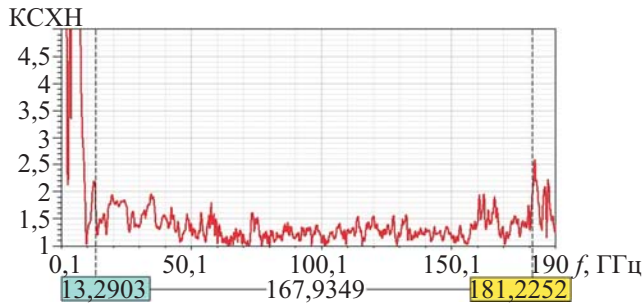


Рис. 3. КСХН антени на рис. 2.



Рис. 4. Зворотні втрати антени на рис. 2.

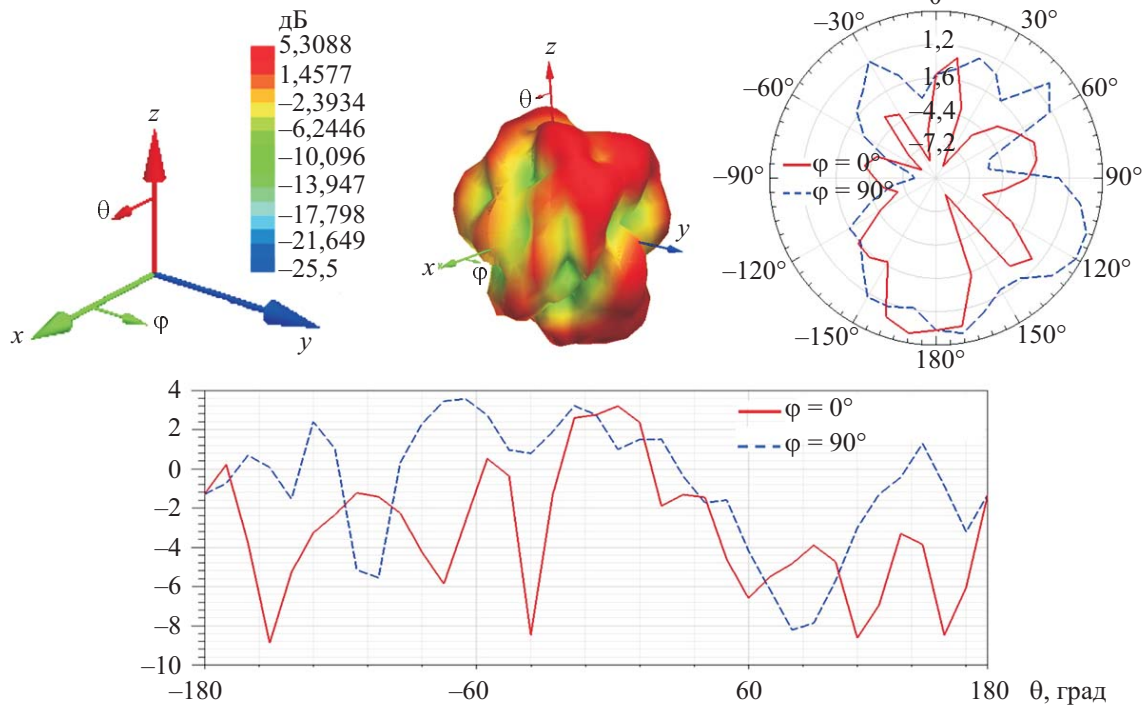


Рис. 5. Діаграма спрямованості розглянутої антени на частоті 25 ГГц.

цьому, незважаючи на вирізи в опорній рамці, слово «антена» було відскановано навіть при незначних порушеннях гармонізації плоскої поверхні та орієнтації смартфона відносно поверхні дисплея, задіяної в проекції топології антени в програмі Ansys EM Suite.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВОЇ МОДЕЛІ АНТЕНИ

Результати розрахунку коефіцієнта стоячих хвиль за напругою (КСХН) та зворотних втрат синтезованої антени, які є загальнопри-

нятими параметрами для аналізу характеристик антен [22], [23], представлено на рис. 3 та 4.

Застосування метавузла в якості еталонного елемента дозволило усунути піки в діапазоні 19–20 ГГц, які присутні в друкованій антені у вигляді первинного мікро QR-коду [15]. Це забезпечило безперервну смугу передачі шириною 167,935 ГГц в діапазоні від 13,29 до 181,225 ГГц. При цьому відносна смуга пропускання [24] дорівнює:

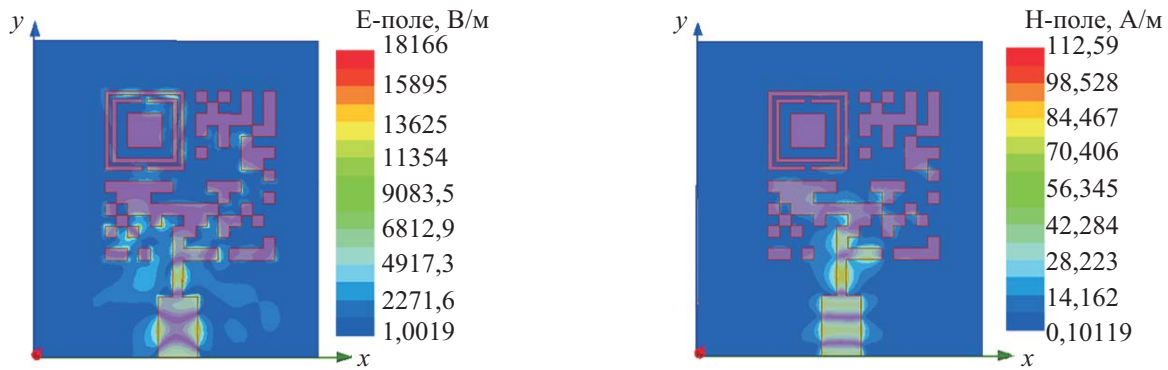


Рис. 6. Розподіл E- і H-полів на поверхні підкладки досліджуваної антени на частоті 25 ГГц.

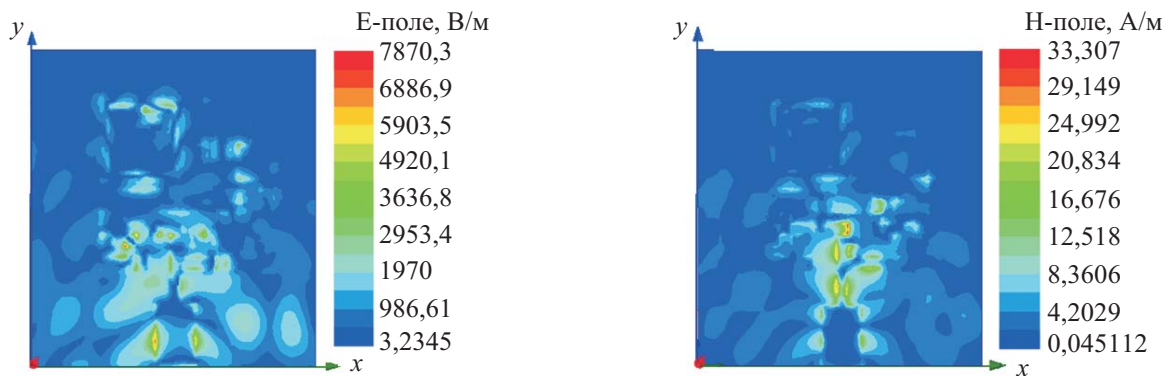


Рис. 7. Розподіл E- і H-полів на верхній поверхні досліджуваної антени на частоті 25 ГГц.

$$\delta F = \frac{2|f_1 - f_2|}{f_1 + f_2} = 1.7267, \quad (8)$$

де f_1 і f_2 — значення частот, на яких КСХН = 2.

Таким чином, отримані дані моделювання підтвердили гіпотезу про ефективність застосування метавузла SRR у вигляді пасивного елемента в складі друкованої антени. Діапазон частот 13,29–181,225 ГГц охоплює всі можливі міліметрові діапазони хвиль 5G і 6G, такі як FR2 від 24,25 до 52,6 ГГц (NR Rel-15) [25] і FR2-2 від 52,6 до 71 ГГц (NR Rel-17) [26].

Діаграма спрямованості розглянутої антени на частоті 25 ГГц показана у 3D і 2D форматах на рис. 5. Важливо підкреслити, що діаграма спрямованості буде змінюватися в залежності від смуги пропускання, і це може вплинути на використання таких елементів в IRS.

Як додаткову ілюстрацію властивостей антени на рис. 6 і 7 показано розподіли E- і

H-полів на поверхні підкладки і на верхній поверхні антени.

Як впливає з рис. 7, основний внесок у випромінювання антени вносять елементи мікро QR-коду, локалізовані в зоні фідера. В даному випадку SRR виступає в ролі пасивного елемента, який коригує основне поле випромінювання.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЛЯ РІЗНИХ ОРІЄНТАЦІЙ SRR

Подальші дослідження спрямовані на вивчення впливу орієнтації вирізів у рамці SRR, інтегрованих в опорний квадратний шаблон мікрокоду, на особливості роботи патч-антени.

На рис. 8 показано орієнтацію вирізів, яка є альтернативою вищеописаній на рис. 2. У цьому випадку виріз зовнішнього кільця розташований над опорною точкою. В результаті

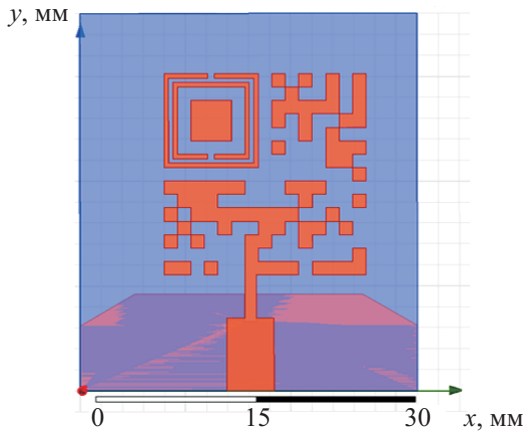


Рис. 8. Альтернативний варіант друкованої антени.

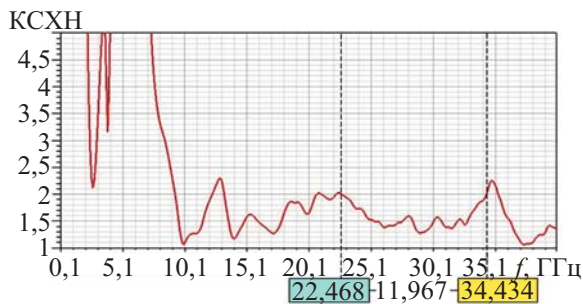


Рис. 9. КСХН антени, що представлена на рис. 8.

моделювання виявилося, що конфігурація на рис. 8 є гіршою, ніж на рис. 2.

Залежність КСХН для антени на рис. 8 представлена на рис. 9. Поряд зі збільшенням КСХН вище рівня 2 на інтервалі частот 34,43–35,1 ГГц, незначне перевищення порогового рівня КСХН = 2,0303 спостерігається на частоті 22,468 ГГц (рис. 9).

Горизонтальна орієнтація вирізів у варіанті рис. 10 також розділяє зазначену частотну область 167,935 ГГц на кілька сегментів, обмежуючи перший з її секторів інтервалом від 13,52 до 33,1997 ГГц (рис. 11). Проте наявність безперервної смуги пропускання дозволяє оцінити конструкцію на рис. 10 як більш ефективну порівняно з рис. 8.

Поворот зовнішнього вирізу SRR вправо дозволив дещо змістити верхній рівень до 33,7576 ГГц (рис. 12) по відношенню до

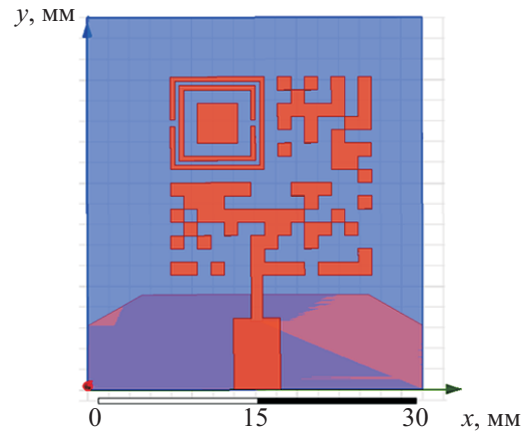


Рис. 10. Конструкція друкованої антени з горизонтальним розташуванням вирізів в опорному елементі.

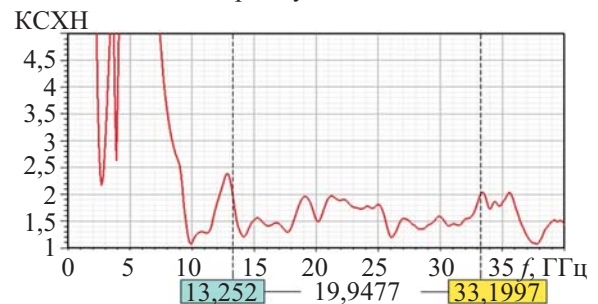


Рис. 11. КСХН антени, зображеної на рис. 10.

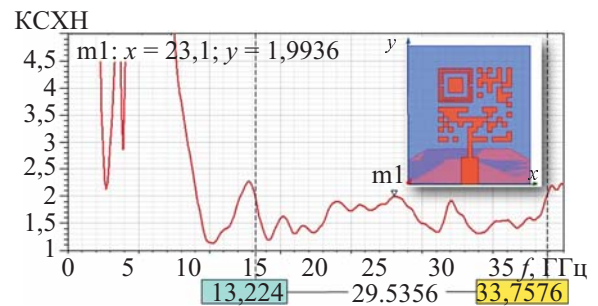


Рис. 12. Альтернативний варіант друкованої антени з горизонтальним розташуванням вирізів в опорному елементі та її КСХН.

33,1997 ГГц (рис. 10). Також дещо знизився нижній рівень відповідного діапазону (13,224 ГГц). Загальна ширина робочої області склала 20,53 ГГц. Загалом, такий спектральний сегмент охоплює міліметровий діапазон хвиль 5G [25]–[27], зокрема робочі смуги NR n257 (26,5–29,5 ГГц), n258 (24,25–27,5 ГГц), n261 (27,5–28,35 ГГц) та n260 (37–40 ГГц), а також

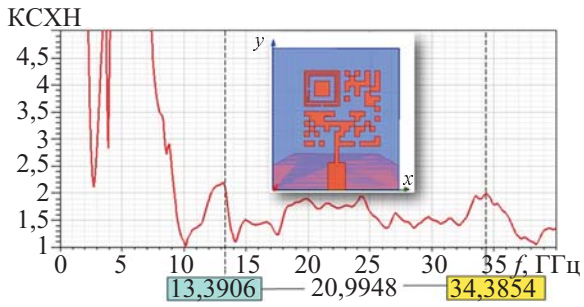


Рис. 13. Модифікація антени з кутовим рознесенням вирізів на 90° і її КСХН.

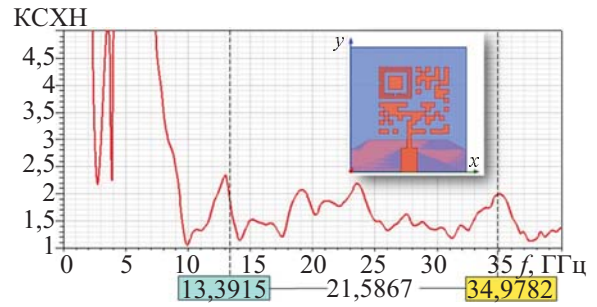


Рис. 14. Альтернативний варіант конструкції антени з кутовим рознесенням вирізів на 90° та її КСХН.

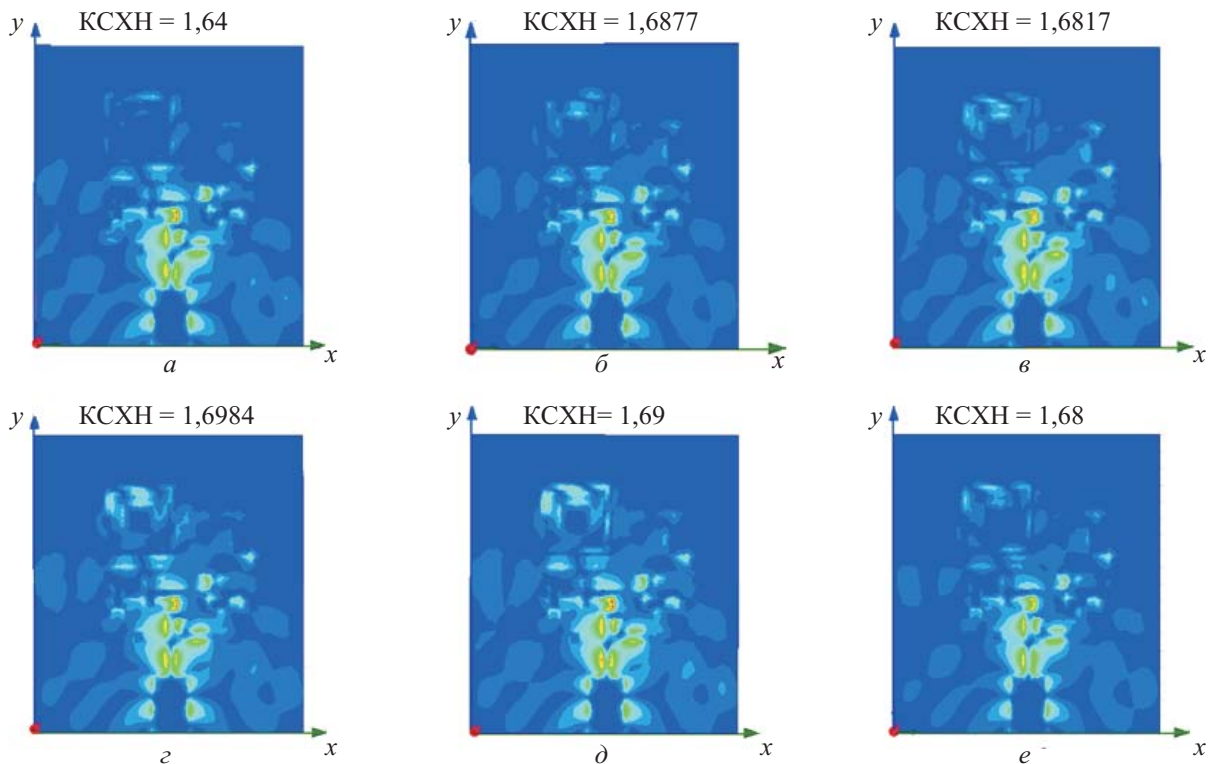


Рис. 15. Розподіл Н-поля на частоті 25 ГГц для всього набору топологій антен: рис. 2 (а); рис. 8 (б); рис.10 (в); рис. 12 (г); рис. 13 (д); рис. 14 (е).

частоти супутникового зв'язку Starlink компанії SpaceX [28], [29].

Поряд з класичною конструкцією квадратної SRR, де вирізи в рамках розташовані вздовж однієї осі [19]–[21], досліджувалися також модифіковані варіанти з кутовим рознесенням вирізів лише на 90° . Один з таких варіантів представлений на рис. 13. Виріз

зовнішньої рамки розташований знизу, а орієнтація вирізу внутрішнього кільця вліво відповідає змінній $Angle_rotat_In = 90^\circ$.

Виявилось, що таке технічне рішення дозволяє зменшити випромінювання на частоті 34,3854 ГГц до рівня КСХН = 1,9956, що формально дозволяє вважати, що смуга пропус-

кання залишається безперервною і на цьому частотному рівні.

Альтернативний варіант (рис. 14) характеризується наявністю піків значень КСХН вище 2,0 на частотах 19 і 23,5 ГГц.

Проведені дослідження дозволили встановити закономірність у розподілі компонентів електричного та магнітного полів вздовж поверхні антени, яка характеризує вплив орієнтації вирізів у межах еталонного елемента на якість антенної компоновки (рівень КСХН). Для ілюстрації такої залежності на рис. 15 наведено варіанти розподілу Н-поля на частоті 25 ГГц для всіх розглянутих топологій антен, і відповідні їм значення КСХН. Як впливає з представлених розподілів, мінімальне значення КСХН відповідає мінімальному випромінюванню Н-поля, в області еталонного SRR. Таку мінімальну амплітуду Н-поля має SRR, що представлений на рис. 2.

Отриманий ефект дає інженерам додатковий інструмент, що дозволяє поліпшити антенну структуру на основі аналізу розподілу Н- і Е-полів, шляхом оптимізації положення щілини в поєднанні з шириною ліній SRR і відстанню між ними.

5. ВИСНОВОК

Ключовим внеском цього дослідження є пропозиція нового підходу до проектування та синтезу друкованих антен з використанням мікро QR-кодів та метаматеріальних реперних структур. Автори показали, що використання SRR-резонаторів в якості метаматеріальних маркерів дозволяє усунути піки на частотній характеристиці, що призводить до отримання безперервного робочого діапазону зі значно ширшою смугою пропускання.

Зокрема, формування метаматеріального елемента на основі еталонного маркера мікро QR-коду дозволяє розширити відносну смугу пропускання відповідної друкованої антени до значення 1,7267 порівняно з 0,8877 в роботі

[15]. Це важливо для використання таких антен у безпроводових системах 6G.

У статті приведено дослідження розподілу компонентів електричного та магнітного полів вздовж поверхні антени, що впливає на якість антенної компоновки, виміряну за рівнем КСХН. Дослідження показало, що розподіл Н-поля на частоті 25 ГГц змінюється в різних топологіях антен, причому мінімальне значення КСХН відповідає мінімальній інтенсивності Н-поля в області еталонного SRR. Цей висновок надає інженерам додатковий інструмент для поліпшення топології антен шляхом оптимізації положення зазору, ширини ліній SRR і відстані між ними на основі аналізу розподілу Н- і Е-полів.

Оскільки оцінка рівня яскравості Н-поля є суб'єктивною, оптимальним рішенням для оптимізації запропонованих антен можна вважати використання нейронних мереж для визначення рівня яскравості Н-поля в поєднанні з генетичним алгоритмом підбору параметрів метаматеріальної комірки.

Результати дослідження дозволяють припустити, що запропонований підхід може бути ефективним рішенням для проектування патч-антен для використання в мітках радіочастотної ідентифікації (RFID) та інших пристроях безпроводового зв'язку, які потребують малогабаритної та ефективної антени для широкого спектру застосувань. Подібний підхід узагальнений авторами і для випадків антен, синтезованих на основі QR-кодів, однак результати відповідних досліджень заслуговують на окремі публікації з огляду на їх значний об'єм.

Подальші зусилля мають бути спрямовані на дослідження впливу параметрів SRR-елемента на характеристики антени. Крім того, слід приділити увагу дослідженню інших топологій антен такого типу з урахуванням кодування різних фраз у мікро QR-кодів та різних форм SRR-елементів. При цьому кращими є

коди, що мають симетричну графічну структуру по відношенню до виводів живлення.

Важливе значення має також вибір місця розташування точки підключення живлення, а при масштабуванні синтезованої друкованої антени стосовно терагерцового діапазону частот важливе значення має реєстрація специфічних ефектів, притаманних наноантенам [30]. До таких специфічних ефектів у наноантенах терагерцового діапазону частот належать квантові обмеження, локалізований поверхневий плазмонний резонанс, нелінійні ефекти, тощо.

Запропонована концепція багатошарової інтеграції декількох мікро QR патч-антен

поєднує в собі технологічні інновації та художній дизайн, забезпечуючи можливість створення платформи, яка використовує фрактальний підхід для формування ієрархічної структури QR-кодів. Ця фрактальна система, що характеризується використанням добутку Кронекера, проникаючого торцевого добутку або блочного матричного добутку Кронекера, дозволяє багаторівневе вбудовування деяких QR-кодів в інші QR-коди, експоненціально збільшуючи густину інформації та можливості взаємодії в межах єдиного візуального простору.

Подано до редакції 23.12.2022

Після доопрацювання 04.05.2023

Прийнята до публікації 11.05.2023

INFORMATION ON THE ARTICLE

PATCH ANTENNAS BASED ON MICRO QR CODES

V. Slyusar, ORCID: 0000-0002-2912-3149, swadim@ukr.net, Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Ukraine

I. Sliusar, ORCID: 0000-0003-1197-5666, islyusar2007@ukr.net, Poltava State Agrarian University, Ukraine

S. Sheleg, ORCID: 00000-0002-1378-2617, ssheleg@yahoo.com, ENIT, Inc., Scottsdale, AZ, USA

The article proposes a new type of broadband patch antennas based on Micro QR codes with integrated metamaterial cell as a marker. In this research, several design options were considered that used the variation of the metamaterial cell parameters. For their analysis, the numerical modeling methods of the Ansys EM Suite program were used due to the complexity of describing the interaction of antennas of non-Euclidean geometry with radio waves. Evaluation and comparison of proposed antennas was conducted by the following characteristics: amplitude-frequency response and voltage standing wave ratio. To expand the frequency band of the synthesized antenna has been implemented the split square marker that is an element of Micro QR. This approach enables the expansion of the relative bandwidth of the corresponding printed antenna to the value of 1.7267 under condition of the continuous transmission band having the width of 167.935 GHz within the range from 13.29 GHz to 181.225 GHz. In this case, cutouts of the split square marker are located along the line coaxial with the power supply line, and the cutout for the outer “ring” is located from below. To synthesize Micro QR code, the word “antenna” was used.

Keywords: amplitude-frequency response; Ansys HFSS; metamaterial; Micro QR; patch antenna; power supply; return loss; voltage standing wave ratio; VSWR

REFERENCES

1. Z. E. Ankarali, B. Pekoz, H. Arslan, “Flexible radio access beyond 5G: A future projection on waveform, numerology, and frame design principles,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18295–18309, 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2684783](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2684783).
2. T. S. Rappaport *et al.*, “Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for

6G and beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729–78757, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2921522](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522).

3. M. H. Alsharif, M. A. M. Albreem, A. A. A. Solyman, S. Kim, “Toward 6G communication networks: Terahertz frequency challenges and open research issues,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 66, no. 3, pp. 2831–2842, 2021, doi: [10.32604/cmc.2021.013176](https://doi.org/10.32604/cmc.2021.013176).

4. H. Zhang, B. Di, L. Song, Z. Han, *Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered 6G*. Cham: Springer International Publishing, 2021, doi: [10.1007/978-3-030-73499-2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73499-2).
5. S. Zhao, B. Xie, Z. Liu, J. An, "Reconfigurable intelligent surface-assisted radar deception electronic counter-countermeasures," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 21, p. 5149, 2023, doi: [10.3390/rs15215149](https://doi.org/10.3390/rs15215149).
6. V. I. Slyusar, "A family of face products of matrices and its properties," *Cybern. Syst. Anal.*, vol. 35, no. 3, pp. 379–384, 1999, doi: [10.1007/BF02733426](https://doi.org/10.1007/BF02733426).
7. Slyusar, V.I., "Generalized face-splitting matrix products in models of digital antenna arrays with nonidentical channels," *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika*, Vol. 46, no. 10, pp. 15–26, 2003, doi: [10.20535/S0021347003100029](https://doi.org/10.20535/S0021347003100029).
8. V. I. Slyusar, "New operations of matrix products for application of radars," in *IEEE MTT/ED/AP West Ukraine Chapter DIPED - 97. Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Theory (IEEE Cat. No.97TH8343)*, 1997, pp. 73–74, doi: [10.1109/DIPED.1997.710918](https://doi.org/10.1109/DIPED.1997.710918).
9. D. Anagnostou, W. Cross, J. Meruga, J. Kellar, "Optically scannable code antenna," US Patent Application Publication US 2014/0263662 A1, 2014.
10. A. M. Numan-Al-Mobin, J. M. Meruga, W. M. Cross, J. J. Kellar, D. E. Anagnostou, "QR code antenna for wireless and security applications," in *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2013, pp. 1728–1729, doi: [10.1109/APS.2013.6711523](https://doi.org/10.1109/APS.2013.6711523).
11. A. M. Numan-Al-Mobin, J. M. Meruga, W. M. Cross, J. J. Kellar, D. E. Anagnostou, "QR code antennas for WiFi/WLAN/Bluetooth applications," in *IEEE International Conference on Electro-Information Technology, EIT 2013*, 2013, pp. 1–2, doi: [10.1109/EIT.2013.6632693](https://doi.org/10.1109/EIT.2013.6632693).
12. A. Md Numan-Al-Mobin, W. M. Cross, J. J. Kellar, D. E. Anagnostou, "RFID integrated QR code tag antenna," in *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–3, doi: [10.1109/MWSYM.2015.7167044](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7167044).
13. G. S. Vardhan, N. Sivadasan, A. Dutta, "QR-code based chipless RFID system for unique identification," in *2016 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2016, pp. 35–39, doi: [10.1109/RFID-TA.2016.7750744](https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2016.7750744).
14. J. Doroshewitz, A. Kaur, J. Nanzer, P. Chahal, "Multi-factor product authentication using integrated Quick Response (QR) code pixelated antenna," *Int. Symp. Microelectron.*, vol. 2017, no. 1, pp. 000608–000612, 2017, doi: [10.4071/isom-2017-THA45_101](https://doi.org/10.4071/isom-2017-THA45_101).
15. V. Slyusar, I. Sliusar, "Micro QR code as the basis of patch antenna topologies," in *2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, 2021, pp. 31–34, doi: [10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716614](https://doi.org/10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716614).
16. С. Банков, А. Курушин, *Расчет Антенн и СВЧ Структур с Помощью HFSS Ansoft*. Москва: ЗАО НИИ Родник, 2009.
17. Online barcode generator." <https://barcode.tec-it.com/ru/MicroQR?data=antenna>.
18. "3D Code Generator." <https://printer.tools/qrcode2stl>.
19. V. Slyusar, "Metamaterials on antenna solutions," in *2009 IEEE 7th Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT'09)*, 2009, pp. 19–24, doi: [10.1109/ICATT.2009.4435103](https://doi.org/10.1109/ICATT.2009.4435103).
20. V. Slyusar, "Metamaterials in the antenna equipment: basic principles and results," *First Mile*, vol. 3, no. 4, pp. 44–60, 2010.
21. I. Sliusar, V. Slyusar, Y. Utkin, O. Kopishynska, "Parametric synthesis of 3D structure of SRR element of the metamaterial," in *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 2020, pp. 577–582, doi: [10.1109/PICST51311.2020.9468067](https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9468067).
22. I. Sliusar, L. Degtyareva, V. Slyusar, S. Voloshko, A. Zinchenko, "Synthesis of quasi-fractal ring antennas," in *2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2019, pp. 741–744, doi: [10.1109/PICST47496.2019.9061286](https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061286).
23. I. Sliusar, S. Voloshko, V. Slyusar, V. Smolyar, "Synthesis of quasi-fractal hemispherical dielectric resonator antennas," in *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 2018, pp. 313–316, doi: [10.1109/INFOCOMMST.2018.8632087](https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632087).
24. B. T. T. Center, "Assessment of ultra-wideband (UWB) technology, Contract No. DAAH01-88-C-0131, ARPA Order 6049," 1990. uri: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA233624.pdf>.
25. "5G NR (Rel-15)." <https://www.3gpp.org/lte-2>.
26. "5G NR (Rel-17)." <https://www.3gpp.org/lte-2>.
27. Prachi Gupta, "Performance improvement of millimeter wave antennas (review)," *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 65, no. 9, pp. 527–547, 2022, doi: [10.20535/S0021347022100016](https://doi.org/10.20535/S0021347022100016).
28. A. Aguilar *et al.*, "Tradespace exploration of the next generation communication satellites," in *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, doi: [10.2514/6.2019-0768](https://doi.org/10.2514/6.2019-0768).
29. U. SpaceX, "Starlink Kit 01437829-004, Regulatory Notices," 2021.
30. В. И. Слюсар, "Наноантенны: подходы и перспективы," *Электроника: наука, технология, бизнес*, no. 2, pp. 58–65, 2009, uri: <https://www.electronics.ru/journal/article/178>.

Received December 23, 2022

Revised May 4, 2023

Accepted May 11, 2023