

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.158>  
УДК 621.396.67

**С.О. Погарський, Д.В. Майборода**

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна  
E-mail: shfmayboroda@gmail.com, spogarsky@gmail.com

## ШИРОКОДІАПАЗОННА ПАТЧ-АНТЕНА НА ОСНОВІ РОЗІМКНУТОГО ПЛОЩИННОГО КІЛЬЦЕВОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

**Предмет і мета роботи.** У статті наведено результати чисельного моделювання патч-антени на основі розімкнутого площинного кільцевого випромінювача, розміщеного над заземленою площиною. Основна мета роботи полягала в оптимізації ключових параметрів антени: ступеня узгодження антени із зовнішніми колами за рахунок вибору способу збудження та варіації значень діелектричної проникності підкладки, коефіцієнта підсилення антени, енергетичних і поляризаційних характеристик.

**Методи і методологія.** Антену спроектовано на основі смужкового розімкнутого кільця. Кутівий параметр розмікального сектора в процесі оптимізації варіювався. Збудження антени здійснювалося за допомогою відрізка копланарної лінії. Чисельне моделювання виконано методом скінченних елементів з використанням моделі напіввідкритого резонатора з урахуванням її обмежувальних умов. Характеристики антени оптимізовані з урахуванням рівня зворотних втрат  $|S_{11}|$ , коефіцієнта підсилення, коефіцієнта еліптичності в заданому частотному діапазоні.

**Результати.** Проаналізовано й оптимізовано частотні та енергетичні характеристики патч-антени на основі розімкнутого площинного кільцевого випромінювача в широкому частотному діапазоні. Установлено характер впливу на значення основних параметрів структури: кутівий розмір розмікального сектора, відстані до заземлювальної основи, значення діелектричної проникності базової підкладки. Установлено можливість формування випромінюваних полів еліптичної поляризації, близької до кругової.

**Висновок.** Вивчено частотні, спектральні та енергетичні характеристики патч-антени на основі розімкнутого площинного кільцевого випромінювача, розміщеного над заземленою площиною. Установлено основні залежності електродинамічних параметрів антени від характерних геометричних розмірів і матеріальних констант. Отримані результати дозволяють прогнозувати використання таких антен як самостійних випромінювачів і як елементів фазованих антенних решіток.

**Ключові слова:** кільцевий резонатор, розмікальний сектор, копланарна лінія, узгодження, частотні характеристики, енергетичні характеристики.

### Вступ

Інтенсивний розвиток систем бездротового зв'язку викликав появу нових типів бездротових

пристроїв, здатних задовольняти вимоги різних мультимедійних застосунків. До таких пристроїв і систем можна віднести стільникові телефони

Цитування: Погарський С.О., Майборода Д.В. Широкодіапазонна патч-антена на основі розімкнутого площинного кільцевого випромінювача. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 2. С. 158–165. <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.158>  
Citation: Pogarsky, S.A., Mayboroda, D.V., 2023. A broadband patch antenna based on a planar unclosed annular radiator. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **28**(2), pp. 158–165. <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.158>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

(смартфони), бездротові локальні мережі (англ. wireless local area networks, WLANs), бездротові персональні мережі (англ. wireless personal area networks, WPANs) та ін. [1–6].

Останнім часом з'явився ще один важливий напрямок їх практичного застосування — це радіотехнічні системи, що використовуються в малогабаритних безпілотних літальних апаратах (БПЛА) [7]. Для того щоб повною мірою реалізувати функціональні можливості таких систем, ці пристрої мають бути багаточастотними та багатомодовими. Це, у свою чергу, висуває певні вимоги до антен таких пристроїв. Насамперед антени мають бути достатньо універсальними, мати фізично малі геометричні розміри, бути широкосмуговими, мати високий коефіцієнт підсилення, легко вбудовуватись у конструкцію пристроїв. Крім того, є певні вимоги до діапазону вхідних імпедансів, поляризації та діаграм направленості оброблюваних полів. Ще однією важливою вимогою до антен такого класу є «гнучкість» — здатність враховувати кривизну поверхні, вздовж якої вони розташовуються. Уся сукупність вимог визначає ефективність використання антен в існуючих системах, а також можливість їх застосування у перспективних системах. Нині відомо досить багато реалізацій площинних антенних систем. Виходячи з вимог необхідної функціональності, конструкції різняться, в основному, топологією патч-елементів, способами збудження антени, наявністю додаткових конструкційних елементів (наприклад, закорочувальних елементів, керованих напівпровідникових елементів та ін.) [8–10]. Незважаючи на таке різноманіття конструкцій, практично завжди залишається відкритим питання про широкосмуговість антени, коефіцієнт підсилення, поляризаційні та спрямовані характеристики, якщо висуваються певні вимоги до геометричних розмірів або спеціальні умови розміщення антени.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває пошук і всебічне дослідження параметрів антен, які б задовольняли такому великому (а часом, і суперечливому) комплексу вимог. У цій роботі наведено опис конструкції та аналіз характеристик широкодіапазонної патч-антени на основі розімкнутого площинного кільцевого випромінювача.

## 1. Досліджувана структура

Розглянемо електродинамічну структуру, що являє собою розімкнений площинний кільцевий патч-елемент, розміщений над металевою площиною. Патч-елемент і площину розділяє додатковий повітряний зазор (рис. 1). Таке розташування випромінювального елемента стосовно металевої поверхні максимально наближене до реальних конструкцій. У конструкції є додатковий діелектричний диск 4, діаметр якого дорівнює зовнішньому діаметру патч-елемента. Його призначення — додаткове узгодження антени із зовнішнім простором.

Геометричні розміри та матеріальні константи обрано з припущенням того, що ця антена призначена для роботи в мікрохвильовому діапазоні. Були вибрані такі параметри: товщина діелектричної підкладки  $h = 0.5$  мм; відносна діелектрична проникність підкладки  $\epsilon_1 = 9.6$ ; зовнішній діаметр патч-елемента  $D = 13.5$  мм; внутрішній діаметр  $d = 2$  мм; кут розкриття розмикального сектора  $\alpha$  — варіативна величина; відносна діелектрична проникність допоміжного диска  $\epsilon_2 = 2.4$ ; відстань до заземлювальної площини  $t$  — варіативна величина. Крім того, передбачалося, що геометричні розміри площини заземлення істотно більше зовнішнього діаметра патч-елемента і робочої довжини хвилі. За дотримання такої умови можна знехтувати струмами, що «затікають» на зворотний бік заземлювального екрана, і мінімізувати зворотне випромінювання.

## 2. Результати числового моделювання

Числове моделювання електродинамічних параметрів таких композиційно складних об'єктів можна реалізувати на основі відомої моделі напіввідкритого резонатора. Модель передбачає, що резонатор утворений двома металевими елементами (заземлена основа та патч-елемент). На цих елементах (у припущенні, що метал ідеальний) виконується класична гранична умова — рівність нулю тангенційної компоненти електричного поля. Ще одним елементом резонатора є циліндрична поверхня, яка визначається проекцією патч-елемента на заземлену основу. На цій поверхні виконується умова магнітної стін-

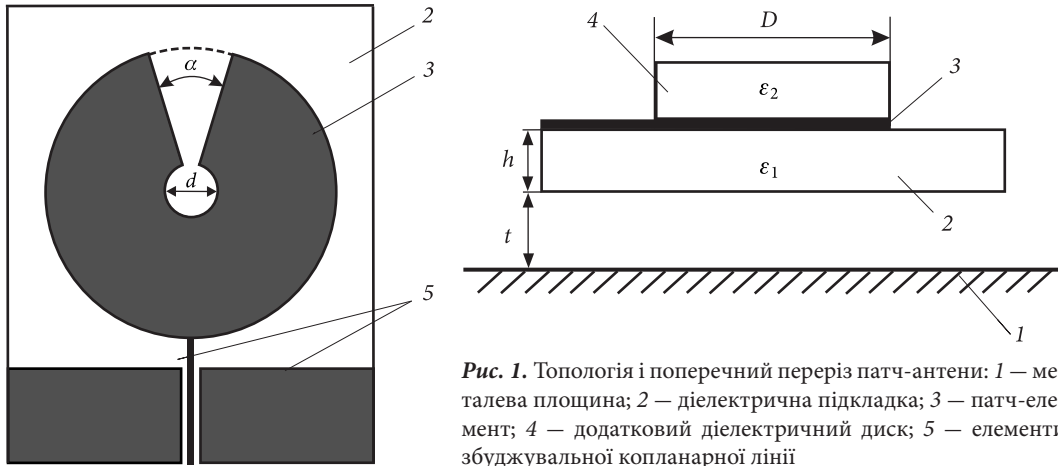


Рис. 1. Топологія і поперечний переріз патч-антени: 1 – металева площина; 2 – діелектрична підкладка; 3 – патч-елемент; 4 – додатковий діелектричний диск; 5 – елементи збуджувальної копланарної лінії

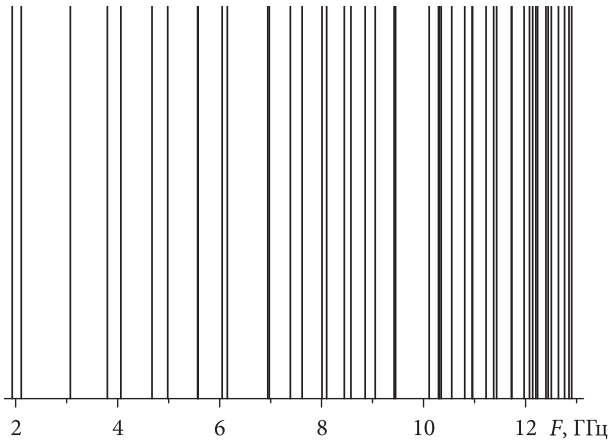


Рис. 2. Спектр власних частот антени з оптимізованим набором параметрів ( $t = 4.22$  мм,  $\alpha = 10.45^\circ$ )

ки. Виходячи з обраного співвідношення параметрів структури і накладаючи певні обмеження на параметр  $t$ , можна дійти висновку: якщо товщина діелектричної підкладки і відстань до заземлювальної площини будуть істотно меншими за резонансну довжину збуджуваної в резонаторі хвилі  $\lambda_{рез}$ , то вектор електричного поля в резонаторі не матиме варіацій уздовж орта системи координат, який перпендикулярний до площини структури. При цьому спектр збуджених у резонаторі коливань включатиме лише коливання типу  $E_{mn0}$  ( $TM_{mn0}$ ).

Для числового моделювання використано метод скінченних елементів (англ. finite element method, FEM), реалізований засобами пакету програм Ansoft HFSS [11]. У рамках цього методу здійснено оптимізацію величини зворотних втрат із використанням варіативних параметрів.

Дослідження будь-якого композиційно складного електродинамічного об'єкта, в якому можливі резонансні явища, очевидно, необхідно розпочинати з дослідження спектра власних частот, збуджуваного у структурі.

На рис. 2 представлений фрагмент спектральної характеристики антени з набором оптимізованих параметрів. Усі власні частоти знайдені з відносною точністю до  $10^{-7} \dots 10^{-8}$ . Характеристика показана лише до частоти 16 ГГц. Це обумовлено тим, що на частотах вище 16 ГГц спектр виявився дуже густим, у спектрі є безліч вироджених типів коливань, і докладний аналіз виявляється не результативним.

Аналіз спектральної характеристики показує, що у діапазоні до 2 ГГц власні типи коливань у структурі не збуджуються. У діапазоні від 2 до 8 ГГц спектр коливань досить розріджений, і є можливість працювати на будь-якому із збуджених типів коливань. На частотах близько 8 ГГц спостерігаються перші два вироджені типи коливань з частотами  $F_1 = 8.147$  ГГц і  $F_2 = 8.21$  ГГц. Роботу поблизу цих частот може дуже ускладнити поляризаційна нестійкість. У діапазоні від 8 до 14 ГГц спектр залишається досить розрідженим і робота можлива на будь-якому з існуючих типів коливань. На частотах понад 14 ГГц відбувається різке згущення спектра, з'являються вироджені типи коливань, тому робота у цьому діапазоні частот є проблематичною. Для вивчення можливості ефективної роботи необхідні додаткові дослідження (крім спектра) рівня узгодження на тій чи іншій частоті, розподіл густин струмів на поверхні патч-елемента для встановлення син-

фазності або протифазності струмів на протилежних частинах патч-елемента.

На рис. 3 представлено розподіл густини поверхневих струмів на патч-елементі на одному з нижчих типів коливань —  $E_{130}$ ). Крім точки збудження, ідентифіковані два фазові центри коливання. Ідентифікація розташування цих центрів необхідна у разі використання коригувальних елементів (наприклад, закорочувальних елементів) для керування параметрами антени. Структура ліній струмів та їхній напрям для цього типу коливань показують, що обидві половини патч-елемента збуджуються синфазно. Синфазність збудження елементів антени визначає певний коефіцієнт підсилення.

Ще одним важливим параметром для будь-якого пристрою НВЧ- і КВЧ-діапазонів є ступінь узгодження пристрою із зовнішніми колами. Цей параметр важливий як для мінімізації впливу на генератор збуджуваних коливань, так і для забезпечення ефективної передачі енергії коливань до кінцевого пристрою. Ступінь узгодження прийнято оцінювати за рівнем зворотних втрат або за величиною КСХН (величиною, пов'язаною з рівнем зворотних втрат). Обидві ці величини є багатопараметричними, залежно від геометричних розмірів елементів антени та матеріальних констант. З цієї причини оцінка рівня узгодження лише за одним параметром не є абсолютним критерієм вирішення питання ефективної роботи пристрою в цілому. Тим не менш, дослідження часткових залежностей рівня зворотних втрат від будь-якого з параметрів дозволяє встановлювати смуги частот, в межах яких можлива ефективна робота того чи іншого пристрою (у даному випадку це ефективне випромінювання).

Відомо, що більшість конструкцій на основі смужкових і мікросмужкових структур мають у своєму складі діелектричну підкладку, на якій розташовуються патч-елементи. Сама підкладка виконує функцію базового конструкційного елемента, бере участь у формуванні певної структури полів, впливає на величину вхідного опору (що, певною мірою, впливає на рівень узгодження пристрою загалом). З огляду на це товщина діелектричної підкладки і значення відносної діелектричної проникності є важливими параметрами. Товщина діелектричної підкладки є вирі-

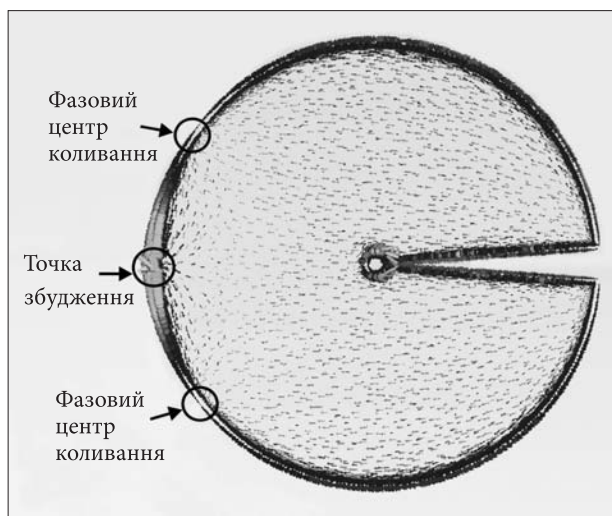


Рис. 3. Розподіл поверхневих струмів на патч-елементі ( $F = 4.498$  ГГц)

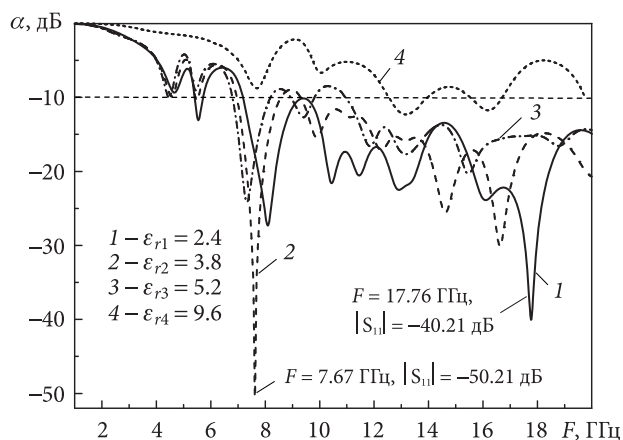


Рис. 4. Залежність зворотних втрат  $|S_{11}|$  від частоти при варіації значень відносної діелектричної проникності підкладки  $\epsilon_1$  ( $t = 4.22$  мм,  $\alpha = 10.45^\circ$ )

шальним фактором для виключення можливості збудження в ній поверхневих хвиль. Приймаючи цю умову, априорі товщину підкладки  $h$  обирають «тонкою» в порівнянні з резонансними довжинами збуджуваних у структурі хвиль і з довжиною робочої хвилі ( $h \ll \lambda_{\text{рез}}$ ,  $h \ll \lambda_{\text{роб}}$ ). У цьому випадку  $h = 0.5$  мм, що істотно менше від мінімальної робочої довжини хвилі  $\lambda_{\text{роб}} = 1.5$  см для частоти  $F = 20$  ГГц.

На рис. 4 наведено залежність від частоти зворотних втрат  $|S_{11}|$  при варіації відносної діелектричної проникності  $\epsilon_1$  підкладки. Для розрахунків були обрані значення відносної діелектричної проникності підкладок, що використовуються в реальних пристроях.

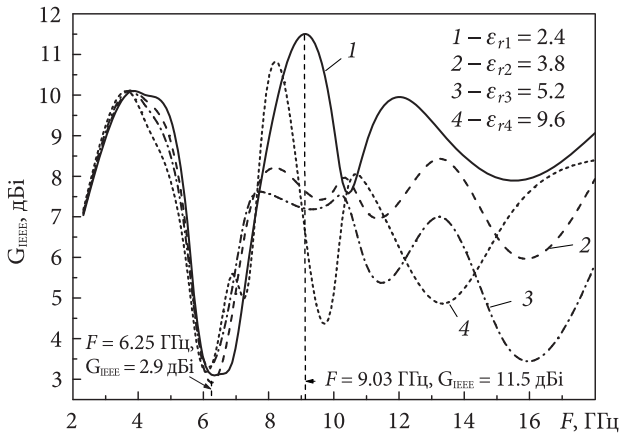


Рис. 5. Залежність коефіцієнта підсилення від частоти при варіації значень відносної діелектричної проникності підкладки  $\epsilon_1$

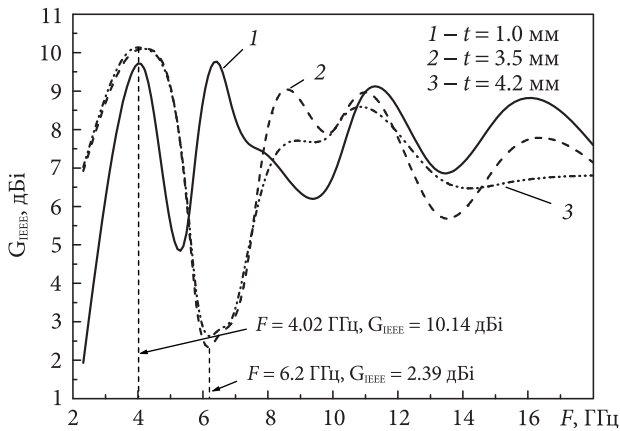


Рис. 6. Залежність коефіцієнта підсилення від частоти при варіації значення відстані  $t$  між діелектричною підкладкою та металевою площиною

Як впливає з наведених графіків, функціональні залежності за будь-яких значень  $\epsilon_1$  мають коливальний характер у всьому частотному діапазоні. Прийнятний рівень зворотних втрат на рівні  $-10$  дБ (відповідає значенню  $K_{СХН} \approx 1.92$ ) спостерігається в досить широкій смузі частот від  $6.7$  до  $20.0$  ГГц при всіх значеннях  $\epsilon_1$ , крім  $\epsilon_1 = 9.6$ . Спостерігаються локальні мінімуми  $|S_{11}|$  у досить вузьких смугах поблизу частоти  $F = 5.47$  ГГц. Поблизу частоти  $F = 7.67$  ГГц у залежностях спостерігаються мінімуми  $|S_{11}|$  для всіх значень  $\epsilon_1$ , однак найменше серед них не досягає рівня  $-10$  дБ. Абсолютний мінімум досягається на частоті  $F = 7.67$  ГГц при значенні  $\epsilon_1 = 3.8$  та становить  $-50.21$  дБ ( $K_{СХН} \approx 1.006$ ). На цій частоті та за такого значення  $\epsilon_1$  узгодження

із зовнішніми колами можна вважати ідеальним і випромінювання антени можна вважати досить ефективним. Однак інші характеристики антени можуть поступатися за величиною значенням на інших частотах в діапазоні рівня зворотних втрат нижче  $-10$  дБ.

Величина відносної діелектричної проникності підкладки істотно впливає і на коефіцієнт підсилення антени. На рис. 5 наведено залежності коефіцієнта підсилення відносно ізотропно випромінювача (за класифікацією IEEE — в ізотропних децибелах, дБі) у частотному діапазоні. Як впливає з графіків, усі залежності мають дуже нерівномірний характер. Лише для значень  $\epsilon_1 = 3.8$  і  $\epsilon_1 = 5.2$  у відносно вузькій смузі частот  $7.2 \dots 10.3$  ГГц коефіцієнт підсилення незначно змінюється поблизу значення  $7.5$ . Завдяки тому, що залежність коефіцієнта підсилення  $G$  є багато-параметричною, для обраної комбінації значень усіх параметрів на частоті  $F = 9.03$  ГГц коефіцієнт підсилення досягає значення  $11.5$ , яке суттєво перевищує «стандартне» значення коефіцієнта підсилення патч-антен (загалом це  $5 \dots 6$ ). При цьому поблизу частоти  $F = 6.25$  ГГц коефіцієнт підсилення становить лише  $2.9$ , причому за будь-якого значення  $\epsilon_1$ . Порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок про те, що найвищі значення коефіцієнта підсилення (і в максимумах, і в середньому по діапазону) досягаються при значенні  $\epsilon_1 = 2.4$ .

Ще одним варіативним параметром у дослідженні характеристик патч-антени була відстань  $t$  від патч-елемента до металевої площини. Цілком очевидно, що з точки зору електродинаміки, цей параметр визначає, по-перше, розмір області, в межах якої відбувається накопичення енергії, а по-друге, цей розмір визначає резонансну частоту резонатора. Сукупність цих двох факторів істотно впливатиме як на коефіцієнт підсилення антени, так і на інші характеристики (діаграму направленості, поляризаційні характеристики та ін.).

На рис. 6 наведено залежність коефіцієнта підсилення від частоти при варіації відстані між діелектричною підкладкою та металевою площиною. З наведених графіків випливає, що залежності мають значною мірою коливальний характер. Причому зі збільшенням відстані до металевої площини амплітуда коливань зменшу-

ється (послаблюється зв'язок між двома елементами системи — патч-структурою та металевою пластиною). При цьому зі збільшенням відстані до  $t = 3.5$  мм і її подальшим зростанням до 4.2 мм коефіцієнт підсилення не змінюється, досягнувши свого максимуму  $G_{IEEE} = 10.14$ . Слід зауважити, що мінімум коефіцієнта підсилення спостерігається приблизно на тій самій частоті, що і при варіації  $\epsilon_1$ , а значення коефіцієнта становить величину 2.39. Занадто мала відстань ( $t = 1.0$  мм), очевидно, призводить до появи додаткових резонансів, і значення коефіцієнта підсилення мають досить великий розкид.

Наявність досить великої кількості варіативних параметрів дозволяє здійснювати синтез антен із заданими характеристиками, причому це стосується як енергетичних, так і поляризаційних характеристик. Високий рівень показників може бути досягнутий за рахунок багатопараметричної оптимізації. Як приклад, на рис. 7 наведено нормовану діаграму направленості антени в кутомісній площині з оптимізованими параметрами на частоті  $F = 7.33$  ГГц, при цьому  $|S_{11}| = -19.985$ . Це не максимальне значення параметра  $|S_{11}|$  (максимум  $|S_{11}|$  досягається на частоті 7.67 ГГц і становить  $-50.21$ , див. рис. 4). Однак такий рівень зворотних втрат забезпечує КСХН = 1.22, що свідчить про достатньо високий рівень узгодження.

Як і передбачалося, за рахунок синфазності збудження патч-елементів діаграма виявилася однопелюстковою. При цьому коефіцієнт підсилення становив  $G_{IEEE} = 9.87$ , рівень бічних пелюсток склав менше  $-25$  дБ, а рівень задньої пелюстки дорівнював  $-23.9$  дБ (через суттєву різницю у значеннях вони не показані). Оптимізоване значення кута розкриття сектора становить  $\alpha = 10.45^\circ$ , оптимізована відстань до металевої пластини  $t = 4.22$  мм, значення відносної діелектричної проникності підкладки  $\epsilon_1 = 3.8$ . На діаграмі лінією зі стрілкою показано напрямком головного максимуму. Він зміщений від нормалі на  $2^\circ$ . Зміщення може бути наслідком особливостей способу збудження антени за допомогою відрізка копланарної лінії. Наявність металевої площини різним чином впливає на електродинамічні характеристики аксіально-симетричного патч-елемента та елементів копланарної лінії. Пунктирними лініями показаний кут, у межах

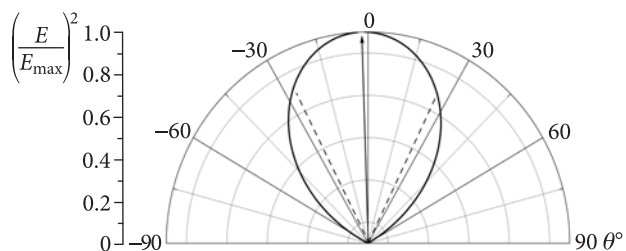


Рис. 7. Нормована діаграма направленості у кутомісній площині антени з оптимізованими параметрами ( $F = 7.33$  ГГц)

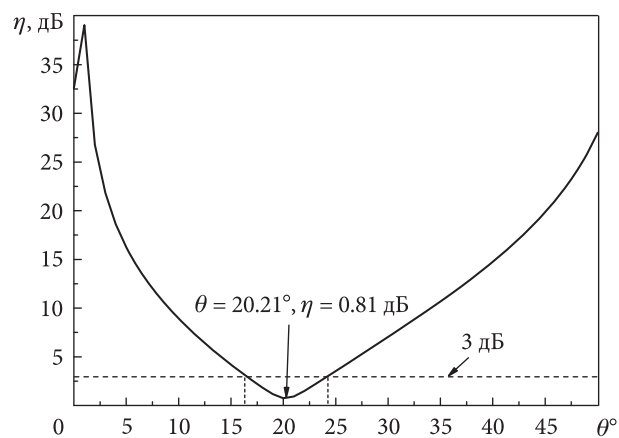


Рис. 8. Поляризаційна характеристика патч-антени на частоті  $F = 7.33$  ГГц

якого амплітуда в головній пелюстці зменшується на 3 дБ; він дорівнює  $52.69^\circ$ .

Змінюючи параметри  $\alpha$ ,  $t$ ,  $\epsilon_1$ , можна отримати діаграми направленості іншої форми (двопелюсткові, косекансквадратні та ін.). Однак це може призвести до погіршення інших параметрів — зниження коефіцієнта підсилення, погіршення узгодження, зміни поляризаційних характеристик.

Ще однією важливою характеристикою є поляризаційна характеристика антени. У більшості випадків площинні патч-антени формують лінійно-поляризовані випромінювані поля, якщо не використовуються допоміжні елементи, які змінюють розподіл струмів на поверхні патч-елементів (наприклад, закорочувальних елементів) або не реалізується двопортове збудження з певним зсувом фаз. У даній патч-антені без використання відомих прийомів вдається отримувати випромінювані поля, еліптично поляризовані з близьким до нуля коефіцієнтом еліптичності (за критерієм IEEE — у децибелах, дБ). На рис. 8 представлено поляризаційну характеристику антени на частоті  $F = 7.33$  ГГц.

Як можна побачити з графіка, в інтервалі кутів спостереження від  $16.3^\circ$  до  $24.2^\circ$  коефіцієнт еліптичності не перевищує значення 3 дБ, тобто поляризація досить близька до кругової. При куті спостереження  $\theta = 20.21^\circ$  коефіцієнт еліптичності становить  $\eta = 0.81$  дБ. В іншому діапазоні зміни кутів поляризація лінійна. Ділянки з поляризацією, близькою до кругової, спостерігаються у всьому частотному діапазоні, якщо частота, що розглядається, близька до частоти збудження будь-якого власного типу коливань. Змінюючи параметри  $\alpha$ ,  $t$ ,  $\varepsilon_1$ , можна керувати смугою кутів спостереження, у межах якої поляризація випромінюваних полів близька до кругової. Однак при цьому можуть погіршуватися інші енергетичні параметри.

## Висновки

У статті представлено результати чисельного моделювання параметрів патч-антени на основі розімкнутого площинного кільцевого випро-

мінювача. Збудження антени здійснювалося за допомогою відрізка копланарної лінії. Патч-елемент і елементи копланарної лінії розміщувалися на діелектричній підкладці та «підвішені» над металеву пластину. На патч-елементі розміщений діелектричний диск такого самого діаметра з мінімальним значенням відносної діелектричної проникності, призначення якого полягало в додатковому узгодженні антени з вільним простором. Числове моделювання показало, що за наявності деякого числа змінюваних параметрів можливе керування частотними та енергетичними параметрами антени в широкому діапазоні частот. Антена досить добре узгоджується в широкому частотному діапазоні і має високі значення коефіцієнта підсилення в порівнянні з відомими конструкціями на основі смужкових і мікросмужкових структур.

Цю роботу було виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (гранти 0122U001486, 0122U001436).

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Wong Kin-Lu. *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. John Wiley & Sons. 2004. 344 p. DOI: 10.1002/0471221112
2. Kumar G., and Ray K.P. *Broadband microstrip antennas*. Artech House. 2003. 407 p. URL: [https://www.academia.edu/33736544/Broadband\\_Microstrip\\_Antenna](https://www.academia.edu/33736544/Broadband_Microstrip_Antenna).
3. Liu Juhua, Xue Quan, Wong Hang, Lai Hau Wah, and Long Yunliang. Design and analysis of a low-profile and broadband microstrip monopolar patch antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013. Vol. 61. Iss. 1. P. 11–18. DOI: 10.1109/TAP.2012.2214996
4. Maiboroda D.V., and Pogarsky S.A. On the choice of optimal topology of a reflecting module based upon the circular microstrip structure. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, Iss. 19. P. 1713–1726. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.20
5. Rajak N., Chatteraj N., and Mark R. Metamaterial cell inspired high gain multiband antenna for wireless applications. *AEU*. 2019. Vol. 109. P. 23–30. DOI: 10.1016/j.aeue.2019.07.003
6. Li Y., and Yu W. A miniaturized triple band monopole antenna for WLAN and WiMAX applications. *Int. J. Antennas Propag.* 2015. Vol. 2015. Id. 46780, 5 p. DOI: 10.1155/2015/146780
7. Karpova L., Boiko J., and Eromenko O. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing. *2019 IEEE Int. Scientific-Practical Conf. Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. (Kyiv, Ukraine, 08–11 Oct. 2019). IEEE, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061357
8. Wang Z., Juhua L., and Yunliang L. A simple wide-bandwidth and high-gain microstrip patch antenna with both sides shorted. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019. Vol.18, Iss. 6. P. 1144–1148. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2911045
9. Ahmad A, Kabeer M., Sanad S., and Olule, L.J. Compact single-varactor diode frequency-reconfigurable microstrip patch antenna. *IET Microwaves Antennas Propag.* 2021. Vol. 15, Iss. 9. P. 1100–1107. DOI: 10.1049/mia2.12117
10. Xue F., Wang H., Wang Y., and Zhang L. Broadband and high efficiency single-layer reflectarray using circular ring attached two sets of phase-delay lines. *PIER M*. 2018. Vol. 66. P. 193–202. DOI: 10.2528/PIERM18010916
11. Ansoft HFSS /ANSYS Academic Research HF (5 tasks): 1 task(s) Permanent with TECS expiring 01-May-2020 Customer # 1076710.

Стаття надійшла 20.02.2023

## REFERENCES

1. Wong, Kin-Lu., 2004. *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. John Wiley & Sons. 344 p. DOI: 10.1002/0471221112
2. Kumar, G., Ray, K.P., 2003. *Broadband microstrip antennas*. Artech House. 407 p. Available at: [https://www.academia.edu/33736544/Broadband\\_Microstrip\\_Antenna](https://www.academia.edu/33736544/Broadband_Microstrip_Antenna).
3. Juhua, Liu, Xue, Quan, Wong, Hang, Lai, Hau Wah, Long, Yunliang, 2013. Design and analysis of a low-profile and broadband microstrip monopolar patch antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **61**(1), pp. 11–18. DOI: 10.1109/TAP.2012.2214996
4. Maiboroda, D.V., Pogarsky, S.A., 2014. On the choice of optimal topology of a reflecting module based upon the circular microstrip structure. *Telecommunication and Radio Engineering*, **73**(19), pp. 1713–1726. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.20.
5. Rajak N., Chatteraj N., Mark R. 2019. Metamaterial cell inspired high gain multiband antenna for wireless applications. *AEU*, **109**, pp. 23–30. DOI: 10.1016/j.aeue.2019.07.003
6. Li, Y., Yu, W., 2015. A miniaturized triple band monopole antenna for WLAN and WiMAX applications. *Int. J. Antennas Propag.*, **2015**, id. 46780, 5 p. DOI: 10.1155/2015/146780
7. Karpova, L., Boiko, J., Eromenko, O., 2019. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing. In: *2019 IEEE Int. Scientific-Practical Conf. Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. Kyiv, Ukraine, 08–11 Oct. 2019. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061357
8. Wang, Z., Juhua, L., Yunliang, L., 2019. A simple wide-bandwidth and high-gain microstrip patch antenna with both sides shorted. *IEEE Antennas and Wirel. Propag. Lett.*, **18**(6), pp. 1144–1148. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2911045
9. Ahmad, A., Kabeer, M., Sanad, S., Olule, L.J., 2021. Compact single-varactor diode frequency-reconfigurable microstrip patch antenna. *IET Microwaves Antennas Propag.*, **15**(9), pp. 1100–1107. DOI: 10.1049/mia2.12117
10. Xue, F., Wang, H., Wang, Y., Zhang, L., 2018. Broadband and high efficiency single-layer reflectarray using circular ring attached two sets of phase-delay lines. *PIER M*, **66**, pp. 193–202. DOI: 10.2528/PIERM18010916
11. Ansoft HFSS /ANSYS Academic Research HF (5 tasks): 1 task(s) Permanent with TECS expiring 01-May-2020 Customer # 1076710.

Received 20.02.2023

S.A. Pogarsky, D.V. Mayboroda

V.N. Karazin Kharkiv National University  
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, UkraineA BROADBAND PATCH ANTENNA BASED  
ON A PLANAR UNCLOSED ANNULAR RADIATOR

**Subject and Purpose.** Results are presented of numerical simulation of a patch antenna in the form of a planar unclosed annular radiator placed above an earthed plane. The work has been aimed at optimizing the key parameters of the antenna, like the degree of its matching with external circuits, achievable through proper selection of the excitation method and variation of the substrate permittivity, antenna gain, and power and polarization characteristics.

**Methods and Methodology.** The antenna has been designed as an unclosed annular strip line. The angular width of the gap in the ring was varied during the optimization process. The antenna is excited via a segment of a coplanar line. The numerical simulation was performed for the unclosed resonator model, with all the limitations imposed on the model in the framework of the finite element method. The performance characteristics of the antenna have been optimized with account of the return loss level, gain magnitude and ellipticity over the given frequency range.

**Results.** Frequency and power characteristics of the patch antenna based on an unclosed annular strip-line radiator have been analyzed and optimized over a broad frequency range. The impact of key parameters of the structure upon its performance characteristics has been established, specifically of the angular width of the gap in the unclosed ring, separation from the ground plane, and dielectric permittivity value in the substrate. The possibility has been demonstrated of generating radiation fields of an elliptical polarization which is rather close to circular.

**Conclusions.** The frequency, spectral and power characteristics studied of a patch antenna built around a planar unclosed annular strip-line radiator above an earthed plane. The numerical modeling was performed within the framework of the finite element method. The principal dependences of the antenna's electrodynamic performance upon such parameters as geometry, characteristic dimensions and material constants have been considered. The results obtained allow suggesting application of such antennas in the capacity of both independent radiators and elements of phased antenna arrays.

**Keywords:** annular resonator, unclosed sector, coplanar line, matching, frequency characteristics, power characteristics.