

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-02>

УДК 537.87

О.М. РИБІН, д. ф.-м. наук, доцент

e-mail: oleg.rybin@karazin.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4472-6861>

Т.П. БАУЛА, аспірант

e-mail: baula612@gmail.com

А.О. ШЕВЧЕНКО, аспірант

e-mail: anshe@uke.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0007-5765-4928>

Р.О. ФОМІН, аспірант

e-mail: rfomin@uke.net

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

МОДИФІКОВАНИЙ ПРИНЦИП МІНІАТЮРИЗАЦІЇ ПРЯМОКУТНИХ НВЧ ПАТЧ-АНТЕН

Актуальність. На даному етапі розвитку технологій основною тенденцією сучасних нанотехнологій є необхідність розміщення якомога більшої кількості об'єктів у заданому об'ємі. У випадку, наприклад, антенних систем це означає прагнення до мініатюризації. Компактність, простота і дешевизна у створенні, простота моделей із проектування патч-антен робить їх особливо привабливими з точки зору мініатюризації антен та антенних систем. Очевидним на перший погляд шляхом для мініатюризації об'ємного профіля таких антен є використання діелектриків з високим значенням діелектричної проникності для створення підкладок патч-антен. Проте, такий підхід обумовлює появу небажаної паразитної ємності між патчем і металічною плівкою підкладки, що призводить до низької ефективності випромінювання патч-антени. Ці труднощі можна подолати за рахунок використання метаматеріальних підкладок з високими значеннями дійсних частин ефективної відносної діелектричної проникності.

Мета роботи. Створити принцип мініатюризації НВЧ прямокутних патч-антен за рахунок використання метаматеріальних металодіелектричних підкладок з високою реальною частиною ефективної відносної діелектричної проникності замість діелектричних підкладок з таким же значенням відносної діелектричної проникності.

Матеріали та методи. Використовуючи принцип мінімізації функції однієї змінної і теорію ефективного середовища, створюється гібридний алгоритм мініатюризації об'ємного профілю патчу антени, який дозволяє оцінити основний зв'язок між значеннями ефективної відносної діелектричної проникності підкладки, резонансною частотою і товщиною метаматеріальної підкладки у НВЧ діапазоні.

Результати. Створено доволі простий підхід щодо мініатюризації прямокутних НВЧ патч-антен та покращення їх випромінювальних характеристик, який фактично є значно покращеною модифікацією принципу мініатюризації прямокутних НВЧ патч-антен, що був запропонований у ранній роботі авторами цієї статті.

Висновки. Запропоновано підхід щодо мініатюризації об'ємного профіля НВЧ прямокутних патч-антен на основі метаматеріальних підкладок та покращення параметрів їх випромінювальних характеристик. Показано, що цей підхід є значно покращеною модифікацією принципу мініатюризації, що був розроблений раніше першим автором цієї роботи, оскільки дозволяє зекономити машинний час, що використовується при автоматизованому проектуванні таких антен, а також дозволяє отримати з більш високою точністю такі параметри мініатюризованих патч-антен як лінійні розміри об'ємного профілю, робочу частоту, коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт посилення за потужністю.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: патч-антена, НВЧ діапазон, метаматеріали, мініатюризація

Як цитувати: Рибін ОМ, Баула ТП, Шевченко А, Фомін РО. Модифікований принцип мініатюризації прямокутних НВЧ патч-антен. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024;41:14-22
<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-02>

In cites: Rybin OM, Baula TP, Shevchenko AO, Fomin RO. A modified miniaturization principle for rectangular microwave patch antennas. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2024;41:14-22
<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-02>

© Рибін О.М., Баула Т.П., Шевченко А.О., Фомін Р.О., 2024

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ВСТУП

Патч-антени широко використовуються у сучасних засобах бездротового зв'язку через малу вагу, компактність та простоту створення. Більше того, простота моделей із проектування таких антен [1] робить їх особливо привабливими з точки зору мініатюризації. Дійсно, у мікросмужкових антенах розмір патчу є пропорційний довжині хвилі всередині підкладки; це означає, що використання підкладок з високою діелектричною проникністю може бути корисним за рахунок зменшення розміру антени. Проте, використання природного матеріалу з лише високою діелектричною проникністю обумовлює появу небажаної паразитної ємності між патчем і металічною плівкою підкладки, що призводить до низької ефективності випромінювання патч-антени і посилення паразитних поверхневих хвиль [2]. Ці труднощі можна подолати за рахунок використання метаматеріальних підкладок, що не тільки дозволяють зменшити об'ємний профіль патч-антени, а також покращити їх випромінювальні характеристики [3-5]. Таке покращення відбувається за рахунок перерозподілу реактивної частини імпедансу антени навантаження між патчем антени і металевими включеннями метаматеріальної підкладки [6].

Останніми роками у відкритому друку була представлена чимала кількість як теоретичних, так і практичних дизайнів мініатюризованих мікросмужкових антен на метаматеріальних підкладках, наприклад [7-9]. Проте математична теорія мініатюризації патч-антен все ще є рідкісним явищем. Так, наприклад, у роботі [10] було представлено доволі просту теорію мініатюризації прямокутних мікрохвильових метаматеріальних патч-антен, однак така теорія суттєво обмежена певними діапазонами ефективної діелектричної проникності та товщини підкладки. В роботі [6] представлена достатньо складна оптимізаційна теорія мініатюризації патч-антен, яка вимагає серйозних обчислювальних витрат.

У цій роботі представлена ще одна достатньо проста теорія мініатюризації прямокутних мікрохвильових патч-антен, яка частково знімає обмеження аналогічної теорії, що представлена в роботі [10]. Особливістю цієї теорії, як і вищезазначених двох теорій, є те, що вона не накладає ніяких обмежень на структуру елементарної комірки метаматеріалу, який має використовуватися при створенні підкладки антени. Апробація цієї теорії проводиться шляхом моделювання певного дизайну прямокутної патч-антени з використанням комерційного ЕМ симулятора, вхідні параметри антени для якого отримані за допомогою моделей представленої теорії.

ЗАДАЧА МІНІМІЗАЦІЇ ПРОФІЛЯ ПАТЧ-АНТЕНИ

У роботі [10] було запропоновано шукати об'ємний профіль прямокутної патч-антени V за допомогою співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} V &= Sd = (S_{eff} - \Delta S)d, \\ S_{eff} &= \frac{1}{2} \lambda_r^2 \left((1 + \varepsilon_r)^2 - \frac{1 - \varepsilon_r^2}{\sqrt{1 + 12\sqrt{2}(d/\lambda_r)\sqrt{1 + \varepsilon_r}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \\ \Delta S &= \frac{0.824}{\sqrt{2}} \lambda_r d \left(\frac{\varepsilon_r - 1 + (1.6 + \varepsilon_r)\sqrt{1 + 12\sqrt{2}(d/\lambda_r)\sqrt{1 + \varepsilon_r}}}{\varepsilon_r - 1 + (0.484 + \varepsilon_r)\sqrt{1 + 12\sqrt{2}(d/\lambda_r)\sqrt{1 + \varepsilon_r}}} \right) \frac{1 + 0.264 \cdot \sqrt{2}(d/\lambda_r)\sqrt{1 + \varepsilon_r}}{\sqrt{1 + \varepsilon_r} + 0.8 \cdot \sqrt{2}(d/\lambda_r)(1 + \varepsilon_r)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де S_{eff} - ефективна площа антени, тобто площа, що обмежена патчем антени без урахування крайових ефектів (а також без урахування його товщини¹), S - фізична площа, що обмежена патчем антени, ΔS - площа, що обмежена областю крайових ефектів, d - товщина підкладки антени, λ_r - довжина хвилі, що відповідає головній резонансній частоті спектру S_{11} - параметру антени, ε_r - відносна діелектрична проникність підкладки антени.

У останній роботі шукався мінімум площини S , як функції змінної ε_r при фіксованих значеннях параметрів λ_r і d . Відповідне наближення для співвідношення між ε_r і параметрами λ_r та d було знайдено при певних обмеженнях діапазонів ефективної діелектричної проникності підкладки та її товщини. Як результат, точність цього відношення не є дуже високою.

В цій роботі пропонується шукати мінімум тільки ефективної площини патчу S_{eff} . Такій підхід обумовлений тим фактом, що площа крайових ефектів дуже слабо залежить від розміру самого патчу, [11]. Більш того, для мети спрощення математичних обчислень, пропонується шукати мінімум S_{eff} як

¹ Тут і далі у роботі будемо нехтувати товщиною патчу

функції змінної $x = \sqrt{1 + \varepsilon_r}$ при фіксованих значеннях параметрів λ_r і d . Обчислення рівняння $\frac{\partial S_{eff}}{\partial x} = 0$ призводить до системи рівнянь відносно змінної ε_r :

$$\left. \begin{aligned} 4x^2 &= 4 \frac{1-x^2}{\sqrt{1+ax}} - \frac{ax^2(2-x^2)}{2(1+ax)^{3/2}}, \\ a &= 12\sqrt{2} \frac{d}{\lambda_r}, \quad x = \sqrt{1+\varepsilon_r}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Оскільки у НВЧ діапазоні $(d/\lambda_r) \ll 1$, а також очікується, що $\text{Re}(\varepsilon_r)$ не більше по порядку величини, ніж 10^2 , тоді розкладемо радикали правої частини рівності з (2) у ряд Тейлора відносно малої величини ax . Утримуючи тільки доданок з першим порядком малості відносно ax , отримаємо у результаті рівняння четвертого ступеню відносно невідомої змінної $x > 0$:

$$\left. \begin{aligned} x^4 + 4bx^3 - (2+3b)x^2 - a &= 0, \\ b &= 8/a. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Як можна бачити з рівняння (3), $\text{Re}(\varepsilon_r) \geq -1$, що є основним обмеженням запропонованого у цій роботі підходу.

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Рівняння (3) у цій роботі розв'язується чисельно з використанням безкоштовного онлайн-програмного забезпечення WolframAlfa, що розроблено компанією Wolfram Research Company.

Розглянемо порівняльне побудування дизайну прямокутної компактної патч-антени на метаматеріальній підкладці за допомогою отриманою у цій роботі теорії, а також принципу мініатюризації, що викладений у роботі [10]. Характеризація випромінювальних характеристик дизайну буде виконуватися з використанням комерційного ЕМ симулятору PLANC FD (Ver. 6.2, що розроблена та створена компанією Information and Mathematical Science Laboratory Inc.), розробленого на основі методу кінцевих різниць у часовій області. Відповідне чисельно-аналітичне моделювання для визначеності буде виконуватися на частоті 10 ГГц і для товщини підкладки $d = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Розв'язок рівняння (3) дає чотири кореня, два із яких відповідають максимуму ефективної площини S_{eff} , а два – її мінімуму. Причому, один з мінімумів відповідає негативному значенню змінною x , що відразу відкидається з фізичних міркувань. Єдине “фізичне” значення цієї змінної дає для шуканої відносної проникності підкладки значення $\varepsilon_r = 15.31$. Відповідне значення на випадок використання методу роботи [10] дає значення $\varepsilon_r = 14.48$.

Нехай у якості метаматеріалу для підкладки буде використаний композит, запропонований у роботі [9], - діелектрична паралелепіпедна матриця з одним шаром симетрично вбудованої металевої ґратки у вигляді мідних циліндричних дротів з круговим перерізом. Приклад зразка такого композиту показано на Рис.1. В цій роботі розглядаються дроти з радіусом $r = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Обчислення у вільному просторі за допомогою вищезазначеного ЕМ симулятору з використанням моделі роботи [12] дає, що відносна діелектрична проникність матеріалу матриці має бути $\varepsilon_m = 13.2$ на випадок, коли $\varepsilon_r = 15.31$, у той час як на випадок $\varepsilon_r = 14.48$ таке значення для відносної діелектричної проникності є $\varepsilon_m = 12.71$. Така не суттєва на перший погляд різниця, як буде показано нижче, серйозним чином відбивається на значенні резонансної частоти антени, яке може бути отримано при чисельному моделюванні з використанням ЕМ симулятору.



Рис. 1. Приклад зразка метаматеріалу для виготовлення підкладки прямокутної компактної НВЧ патч-антени (зліва) і зразка із матеріалу матриці тих же розмірів (справа)
Fig. 1. Example of a metamaterial sample for fabrication a rectangular compact microwave patch antenna substrate (left) and a sample made of matrix material of the same dimensions (right)

Значення лінійних розмірів патчу L (довжина патчу) і W (ширина патчу) на випадок діелектричної підкладки здійснюється з використанням класичних моделей, представлених у роботі [1]

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} - 0.824d \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3)(W/d + 0.264)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258)(W/d + 0.8)}, \\ \varepsilon_{\text{reff}} &= \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{d}{W} \right]^{-1/2}, \\ W &= \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{1 + \varepsilon_r}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $f_r = c/\lambda_r$ - головна резонансна частота спектру S_{11} - параметру антени, c - швидкість світла у вакуумі, ΔL - довжина області крайових ефектів. Відповідні обчислення за допомогою рівнянь системи (4) дають: $L = 0.0039m$ і $W = 0.0052m$. Тут і далі у роботі для зручності будемо називати таку антену зразковою.

Згідно з результатами роботи [10], розміри оптимального (мінімізованого) дизайну прямокутної патч-антени при отриманому значенні відносної діелектричної проникності підкладки визначаються рівностями:

$$\left. \begin{aligned} L_{\min} &= \frac{1}{16\sqrt{6\sqrt{2}}} \sqrt{\frac{\lambda_r^3}{d}} \left(1 - \frac{1}{16\sqrt{54\sqrt{2}}} \left(\frac{\lambda_r}{d} \right)^{3/4} \right) - 0.824d, \\ W_{\min} &= \frac{1}{16\sqrt{6\sqrt{2}}} \sqrt{\frac{\lambda_r^3}{d}}, \\ \varepsilon_r &= 512\sqrt{2} \frac{d}{\lambda_r}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Відповідні обчислення за допомогою рівностей системи (5) дають зменшені значення для довжини і ширини патчу антени: $L_{\min} = 0.0014m$, $W_{\min} = 0.0037m$, що дозволило зменшити об'ємний профіль антени на 74%. Тут і далі у роботі для зручності будемо називати антену з довжиною і шириною патчу, обчисленого за допомогою принципу роботи [10], мініатюризованою патч-антеною.

Скорегуємо оптимальний (мінімізований) профіль антени при умові нового отриманого "оптимального" значення $\varepsilon_r = 15.31$ на заданій частоті $f_r = 10\Gamma\Gamma\text{ц}$. Остання рівність у системі (3) дає нові значення для усіх лінійних параметрів нового "оптимізованого" патчу: $d = 6.34 \cdot 10^{-4}m$, $L_{\min} = 0.0012m$, $W_{\min} = 0.0036m$, що дозволило зменшити об'ємний профіль антени на 77%. Тут і далі у роботі для зручності будемо називати антену з довжиною і шириною патчу, обчисленого за допомогою запропонованого підходу, мініатюризованою-корегованою патч-антеною.

Представляє інтерес розглянути як проведене чисельне корегування оптимального профілю патч-антени на метаматеріальній підкладці відбилося на спектрі зворотних втрат антени. Так, на Рис.2 представлено спектри S_{11} -параметру антен: а) з діелектричною підкладкою (зразкова антена) з $d = 6 \cdot 10^{-4}m$, $L = 0.0039m$ і $W = 0.0052m$, довжина і ширина патчу якої обчислювалися за допомогою формул (4); б) з метаматеріальною підкладкою з $d = 6 \cdot 10^{-4}m$, $L = 0.0014m$, $W = 0.0037m$, довжина і ширина патчу, а також ширина підкладки якої обчислювалися за допомогою формул (5) при $r = 0.5 \cdot 10^{-4}m$; в) з метаматеріальною підкладкою з $d = 6.34 \cdot 10^{-4}m$, $L = 0.0012m$, $W = 0.0036m$, довжина і ширина патчу, а також ширина підкладки якої обчислювалися за допомогою запропонованого підходу і формул (5) при $r = 0.5 \cdot 10^{-4}m$.

Як можна бачити зі спектрів Рис.2, запропонований підхід дає більш точну оцінку головної резонансної частоти в порівнянні з принципом мініатюризації роботи [10]: $f_r = 10.318\Gamma\Gamma\text{ц}$ для зразкової патч-антени; $f_r = 9.505\Gamma\Gamma\text{ц}$ для мініатюризованої патч-антени; $f_r = 10.344\Gamma\Gamma\text{ц}$ для мініатюризованої-корегованої патч-антени. Більш того, узгодження антени у останньому випадку краще, ніж у випадку дизайну мініатюризованої патч-антени, розробленої за допомогою принципу мініатюризації, запропонованому у роботі [10]. Крім того, мініатюризована патч-антена, у свою чергу, краще узгоджена ніж зразкова патч-антена з причини, що зазначена у вступній частині цієї статті. З іншого боку, перерозподіл реактивної частини імпедансу антени навантаження між патчем антени і металевими включеннями метаматеріальної підкладки призводить до того, що також відбувається енергетичний перерозподіл спектру S_{11} -параметру антени. Дійсно, як можна бачити з Рис.2 цей спектр у випадку мініатюризованих антен містить меншу кількість вторинних резонансів, які не можуть бути використані для функціонування антени.

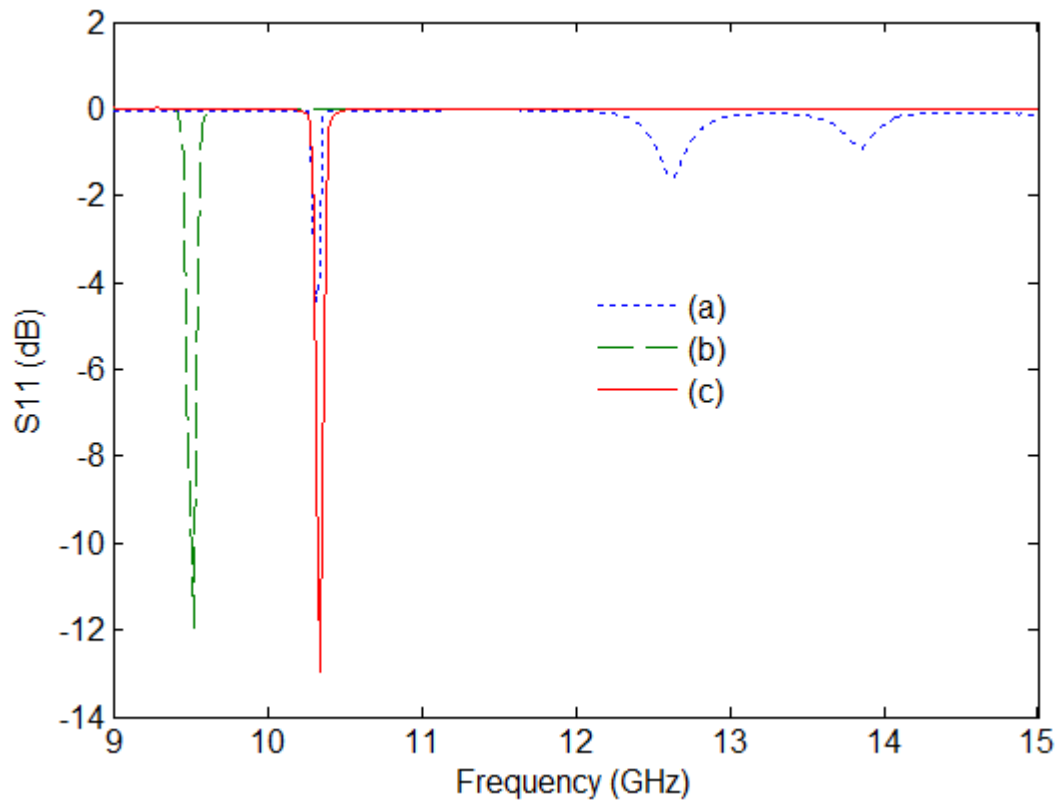


Рис. 2. Спектр S_{11} -параметру (а) зразкової патч-антени, (б) мініатюризованої патч-антени, (с) мініатюризованої-корегованої патч-антени

Fig. 2. Spectrum S_{11} -parameter of (a) sample patch antenna, (b) miniaturized patch antenna, (c) miniaturized-corrected patch antenna

Зауважимо, що довжина L_{sub} і ширина W_{sub} всієї антени (тобто її підкладки) обчислювалася у цій роботі за допомогою виразів [10]:

$$\left. \begin{aligned} L_{sub} &= L + 6\Delta L, \\ W_{sub} &= W + 6\frac{\ln 4}{\pi}d. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Моделювання діаграм спрямованостей трьох вище зазначених патч-антен з використанням симулятора PLANC FD призводять до цілком очікуваного результату: діаграми спрямованостей усіх антен близькі між собою якісно і кількісно, в особливості це стосується мініатюризованої і мініатюризованої-корегованої патч-антен, Рис.3. З іншого боку, відсутність такої схожості між діаграмами спрямованостей свідчила б про принципову помилковість запропонованого підходу. Чисельні розрахунки також показали, що: 1) коефіцієнт корисної дії (ККД) зразкової антени дорівнює 47.7%, максимальне значення коефіцієнта посилення за потужністю (КПП) дорівнює 4.83 dB і досягається при $\theta = 180^\circ$; 2) ККД мініатюризованої антени дорівнює 63.2%, максимальне значення коефіцієнта КПП дорівнює 5.69 dB і досягається при $\theta = 0^\circ$; 3) ККД мініатюризованої-корегованої антени дорівнює 63.9%, максимальне значення КПП дорівнює 5.74 dB і досягається при $\theta = 0^\circ$. Останні результати також вказують на перевагу запропонованого підходу над принципом мініатюризації, що був запропонований у роботі [10].

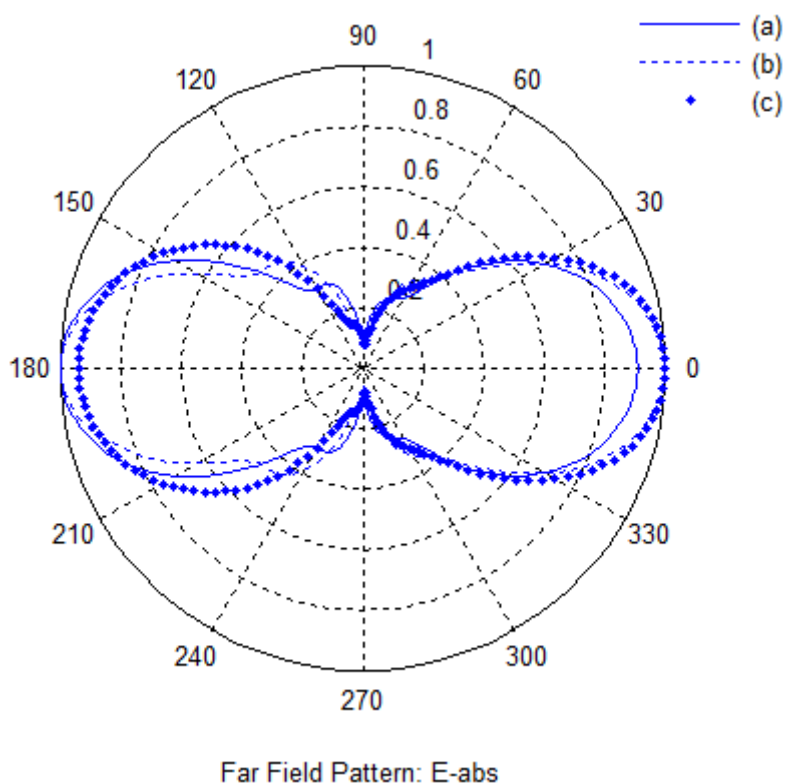


Рис. 3. Діаграма спрямованості електричного поля (а) зразкової патч-антени, (б) мініатюризованої патч-антени, (с) мініатюризованої-корегованої патч-антени

Fig. 3. Electric field pattern of (a) sample patch antenna, (b) miniaturized patch antenna, (c) miniaturized-corrected patch antenna

Важливим аспектом використання будь-якої компактної антенної системи є якомога мале значення інтенсивності близького поля з точки зору негативного впливу ЕМ випромінювання на людину. В цій роботі розподіл інтенсивності близького поля в двох перерізах усіх дизайнів трьох вище зазначених антен був обчислений з використанням симулятора PLANC FD и показаний на Рис.4-6.

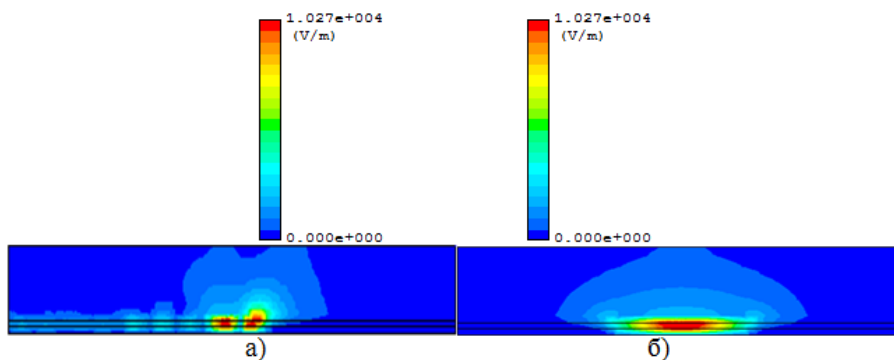


Рис. 4. Розподіл поля в ближній зоні зразкової патч-антени на частоті 10,318 ГГц в перерізі вздовж патчу (а) і в перерізі, перпендикулярно до патчу (б)

Fig. 4. Near field distribution of a sample patch antenna at 10.318 GHz in a section along the patch (a) and in a section perpendicular to the patch (b)

Як можна бачити з Рис.4-6, інтенсивність близького поля обох дизайнів мініатюризованих патч-антен значно менше інтенсивності близького поля зразкової патч-антени, проте розподіл поля поблизу перших двох дизайнів не суттєво відрізняється один від одного.

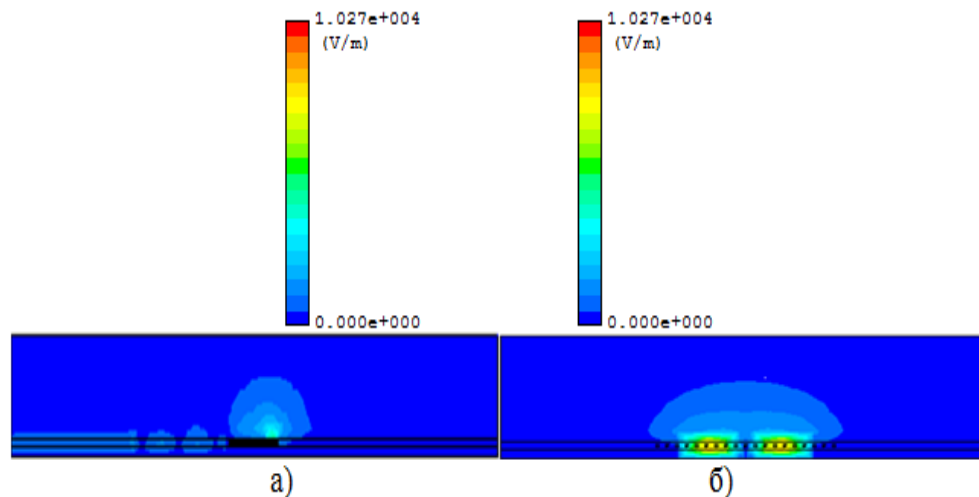


Рис. 5. Розподіл поля в ближній зоні мініатюризованої патч-антени на частоті 9,505 ГГц в перерізі вздовж патчу (а) і в перерізі, перпендикулярно до патчу (б)

Fig. 5. Near field distribution of a miniaturized patch antenna at 9.505 GHz in a section along the patch (a) and in a section perpendicular to the patch (b)

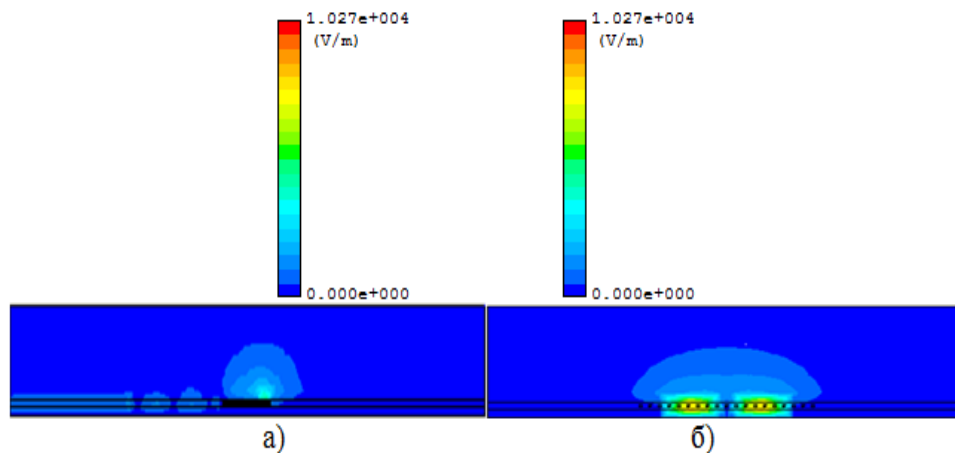


Рис. 6. Розподіл поля в ближній зоні мініатюризованої-корегованої патч-антени на частоті 10,344 ГГц в перерізі вздовж патчу (а) і в перерізі, перпендикулярно до патчу (б)

Fig. 6. Near field distribution of a miniaturized-corrected patch antenna at 10.344 GHz in a section along the patch (a) and in a section perpendicular to the patch (b)

Таким чином, з огляду на вище зазначений аналіз, можна зробити висновок, що запропонований у цій роботі підхід фактично є значно покращеною модифікацією принципу мініатюризації НВЧ патч-антен, що був запропонований у роботі [10]. Це впливає з того, що цей підхід дозволяє зекономити машинний час і дозволяє отримати з більш високою точністю такі параметри мініатюризованих антен як лінійні розміри об'ємного профілю, робочу частоту, ККД і КПП.

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано підхід щодо мініатюризації об'ємного профілю НВЧ прямокутних патч-антен на основі метаматеріальних підкладок та покращення параметрів їх випромінювальних характеристик. Показано, що цей підхід є значно покращеною модифікацією принципу мініатюризації, що був розроблений раніше авторами цієї роботи, оскільки дозволяє зекономити машинний час, що використовується при автоматизованому проектуванні таких антен, а також дозволяє отримати з більш високою точністю такі параметри мініатюризованих патч-антен як лінійні розміри об'ємного профілю, робочу частоту, коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт посилення за потужністю.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор повідомляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Balanis CA. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd edition by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
2. Singh D, Thakur A, and Srivastava VM. "Miniaturization and gain enhancement of microstrip patch antenna using defected ground with EBG." Journal of Communications. vol. 10, no.12, pp. 730-736, 2018. <https://doi.org/10.12720/jcm.13.12.730-736>
3. Buell K, Mosallaei H, and Sarabandi K. A "Substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. vol.54, Issue 1, pp. 105-146, 2006. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.860329>
4. Jarchi S, Rashed-Mohassel J, and Faraji-Dana R. "Proximity effects of a layered periodic structure on miniaturization of patch antennas." International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. vol.23, No.15, pp. 549-558, 2010. <https://doi.org/10.1002/mmce.20689>
5. Hayet B, Hacen Noureddine B. "Miniaturization and bandwidth improvement of a circular microstrip antenna using metamaterials." Journal of Electrical and Electronics Engineering. vol.14, No.2, pp. 5-10, 2021. <https://www.proquest.com/openview/30098c3f99e065a5fae62ed6e91b63fb/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54417>
6. Rybin O. Metamaterials: Technology and Applications. Edited by Pankaj Kumar Choudhury. Chapter 12: The Principles of Miniaturization of Patch Antennas, pp. 310-349. CRC press, 2021.
7. Рибін ОМ, Шульга СМ. "Автоматизоване НВЧ проєктування мініатюризованих прямокутних мікросмужкових антен з метаматеріальними підкладками." Радіофізика та Радіоастрономія. т.21, №2, сс. 141-147, 2016. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/106482>
8. Rybin O, Shulga S. "Advanced microwave effective medium theory for two-component nonmagnetic metamaterials: Fundamentals and antenna substrate application." Journal of Computational Electronics. vol.16, no.2, pp. 369-383, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10825-017-0979-6>
9. Slyusar V., Sliusar I. & Sheleg S. "Patch Antennas Based on Micro QR Codes." Radioelectron.Commun.Syst., vol. 66, pp. 251–262, 2023. <https://doi.org/10.3103/S073527272307004X>
10. Rybin O. "Microwave miniaturization concept for narrow band rectangular patch antenna structures." The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. vol.48, no.1, pp. 69-75, 2015. <https://doi.org/10.3233/JAE-140197>
11. Garg R, Bhartia P, Bahl I, Ittipiboon A. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, Boston, London, 2001.
12. Ghodgaonkar DK, Varadan VV, and Varadan VK. "Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. vol.39, no. 2, pp. 387–394, 1990. <https://doi.org/10.1109/19.52520>

REFERENCES

1. Balanis CA. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd edition by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
2. Singh D, Thakur A, and Srivastava VM. "Miniaturization and gain enhancement of microstrip patch antenna using defected ground with EBG." Journal of Communications. vol. 10, no.12, pp. 730-736, 2018. <https://doi.org/10.12720/jcm.13.12.730-736>
3. Buell K, Mosallaei H, and Sarabandi K. A "Substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. vol.54, Issue 1, pp. 105-146, 2006. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.860329>
4. Jarchi S, Rashed-Mohassel J, and Faraji-Dana R. "Proximity effects of a layered periodic structure on miniaturization of patch antennas." International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. vol.23, No.15, pp. 549-558, 2010. <https://doi.org/10.1002/mmce.20689>
5. Hayet B, Hacen Noureddine B. "Miniaturization and bandwidth improvement of a circular microstrip antenna using metamaterials." Journal of Electrical and Electronics Engineering. vol.14, No.2, pp. 5-10, 2021. <https://www.proquest.com/openview/30098c3f99e065a5fae62ed6e91b63fb/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54417>
6. Rybin O. Metamaterials: Technology and Applications. Edited by Pankaj Kumar Choudhury. Chapter 12: The Principles of Miniaturization of Patch Antennas, pp. 310-349. CRC press, 2021.
7. Rybin O, Shulga S. "Microwave CAD for miniaturized rectangular patch antennas with metamaterial substrates." Radio Physics and Radio Astronomy. vol.21, №2, pp. 141-147, 2016. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/106482>
8. Rybin O, Shulga S. "Advanced microwave effective medium theory for two-component nonmagnetic metamaterials: Fundamentals and antenna substrate application." Journal of Computational Electronics. vol.16, no.2, pp. 369-383, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10825-017-0979-6>
9. Slyusar V., Sliusar I. & Sheleg S. "Patch Antennas Based on Micro QR Codes." Radioelectron.Commun.Syst., vol. 66, pp. 251–262, 2023. <https://doi.org/10.3103/S073527272307004X>
10. Rybin O. "Microwave miniaturization concept for narrow band rectangular patch antenna structures." The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. vol.48, no.1, pp. 69-75, 2015. <https://doi.org/10.3233/JAE-140197>
11. Garg R, Bhartia P, Bahl I, Ittipiboon A. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, Boston, London, 2001.
12. Ghodgaonkar DK, Varadan VV, and Varadan VK. "Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. vol.39, no. 2, pp. 387–394, 1990. <https://doi.org/10.1109/19.52520>

Стаття надійшла до редакції: 23 жовтня 2024 р.

Рекомендовано до друку: 04 грудня 2024 р.

MODIFIED PRINCIPLE OF MINIATURISATION OF RECTANGULAR MICROWAVE PATCH ANTENNAS

O. Rybin, T. Baula, A. Shevchenko, R. Fomin.

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. At this stage of technology development, the main trend in modern nanotechnology is the need to accommodate as many objects as possible in a given volume. In the case of, for example, antenna systems, this means striving for miniaturization. The compactness, simplicity of design models, and low cost of patch antenna make them particularly attractive in terms of miniaturization of antennas and antenna systems. At first glance, the obvious way to miniaturize the volume profile of such antennas is to use dielectrics with a high permittivity which are needed to create patch antenna substrates. However, this approach causes the appearance of undesirable parasitic capacitance between the antenna patch and the metal background of the substrate, which leads to low radiation efficiency of the patch antenna. These difficulties can be overcome by using metamaterial substrates with high values of the real parts of the effective relative permittivity.

Objectives. To create the principle of miniaturization of microwave rectangular patch antennas by using metamaterial metal-dielectric substrates with a high real part of the effective relative permittivity instead of dielectric substrates with the same value of the relative permittivity.

Materials and methods. The problem of radiation of the obtained antenna array structures is solved by numerical methods in time domain. This approach makes it possible to accurately take into account all the design features of the constructed arrays.

Results. Using the principle of minimization of a function of one variable and the effective medium theory, a hybrid approach for miniaturization of the antenna patch volume profile is created. The principle allows us to obtain the main relationship between the values of the effective relative permittivity of the substrate, the resonant frequency and the thickness of the metamaterial substrate in the microwave range.

Conclusion. An approach for miniaturization of the volume profile of microwave rectangular patch antennas to be created on metamaterial substrate is proposed. The approach helps to improve the antenna performance. It is shown that this approach significantly improves the earlier miniaturization principle developed by the first author of this work in such a way that it enables to economize machine time used in the automated design of such antennas, and also enables to allow an obtaining with higher accuracy such antenna parameters as the linear dimensions of the volume profile, operating frequency, efficiency and power gain.

KEY WORDS: Patch antennas, microwave frequency range, metamaterials, miniaturization

The article was received by the editors: October 23 2024

The article is recommended for printing: December 04 2024