

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-45>

УДК: 621.396.2

Рощенко Олексій Миколайович, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З РАДІОКАНАЛАМИ

Рощенко О.М. Дослідження особливостей проектування радіотехнічних систем з радіоканалами. У статті проведено огляд особливостей формування архітектури радіотехнічних систем з радіоканалами. Розкрито проблематику даного дослідження, наголошено, що внаслідок природних впливів, випромінююча поверхня антени деформується, змінюючи просторові амплітудно-фазові розподіли джерел збудження, що відповідають діаграмам спрямованості. Підкреслено, що сучасний математичний синтез рамкових антен не дозволяє отримати рішення з необхідною точністю для антен, що складаються з криволінійних провідників або розташованих в безпосередній близькості від інших об'єктів, а також у разі антенної решітки. Запропоновано використання принципу заміни просторової діаграми спрямованості її наближеним поданням у вигляді добутку функцій, що описують одноплосинні діаграми спрямованості у головних перерізах. Окреслено математичний апарат даного підходу та описано необхідність з'єднання центру антени з центром кола, що має радіус, який дорівнює відстані від цього центру до точки спостереження. Графічно представлено модуль коефіцієнта відбиття на вході антени відповідно до результатів чисельного моделювання, за результатами якої встановлено, що для зсуву резонансної частоти антени в потрібний діапазон необхідно збільшити сумарну ємність включених в ланцюг конденсаторів. Охарактеризовано шляхи модифікації планарних конденсаторів, за обраним варіантом зроблено висновок щодо значного погіршення характеристик другого зразка. Проведені додаткові чисельні розрахунки та, як результат, отримана графічна залежність розподілу нормальної (по відношенню до площини антени) компоненти вектора напруженості магнітного поля для двох зразків, що розглядаються. Зазначається, що незважаючи на геометрично рівномірне розташування додаткових конденсаторних ліній, їх внесення до структури призводить до значної нерівномірності у розподілі поверхневого струму по периметру рамки та суттєвому зменшенню його амплітуди в окремих зонах антени. Змодельовано додаткову ситуацію коли поблизу точки живлення в розрив основного провідника додано чіп-конденсатор ємністю 0,82 пФ, а відстань між підкладкою і екраном зменшено до 25 мм. Дієвість даного підходу доведено, відзначено невелике збільшення дистанції ресстрації, що пояснюється покращенням узгодження антени з лінією живлення.

Ключові слова: принцип, архітектура, стандарт, антена, моделювання, модернізація, перепроєктування, зв'язок, мережа.

Roschenko O. Study of design features of radio engineering systems with radio channels. The article reviews the peculiarities of the formation of the architecture of radio technical systems with radio channels. The problems of this study are revealed, it is emphasized that due to natural influences, the radiating surface of the antenna is deformed, changing the spatial amplitude-phase distributions of the excitation sources corresponding to the directional diagrams. It is emphasized that the modern mathematical synthesis of frame antennas does not allow obtaining solutions with the necessary accuracy for antennas consisting of curved conductors or located in close proximity to other objects, as well as in the case of an antenna array. It is proposed to use the principle of replacing the spatial directional diagram with its approximate representation in the form of a product of functions describing single-plane directional diagrams in the main sections. The mathematical apparatus of this approach is outlined and the need to connect the center of the antenna with the center of a circle with a radius equal to the distance from this center to the observation point is described. The module of the reflection coefficient at the input of the antenna is graphically presented according to the results of numerical modeling, according to the results of which it was established that in order to shift the resonant frequency of the antenna to the desired range, it is necessary to increase the total capacity of the capacitors included in the circuit. The ways of modification of planar capacitors are characterized, according to the selected option, a conclusion is made regarding the significant deterioration of the characteristics of the second sample. Additional numerical calculations were carried out and, as a result, a graphical dependence of the distribution of the normal (with respect to the antenna plane) component of the magnetic field intensity vector was obtained for the two samples under consideration. It is noted that despite the geometrically uniform arrangement of additional capacitor lines, their introduction to the structure leads to significant unevenness in the distribution of the surface current along the perimeter of the frame and a significant decrease in its amplitude in individual areas of the antenna. An additional situation was simulated when a chip capacitor with a capacity of 0.82 pF was added near the power point to the gap of the main conductor, and the distance between the substrate and the screen was reduced to 25 mm. The effectiveness of this approach has been proven, a slight increase in the registration distance has been noted, which is explained by the improvement of the alignment of the antenna with the power line.

Keywords: principle, architecture, standard, antenna, modeling, modernization, redesign, communication, network.

Вступ та постановка проблеми. Радіотехнічні системи з радіоканалами пред'являють підвищені вимоги до перешкодозахищеності, спрямованості та точності просторової орієнтації їх антен, особливо в діапазоні надвисоких частот (НВЧ), що називається при довжині хвилі $\lambda \leq 30$ см мікрохвильовим [1, 2], породжують проблему їх оптимального проектування. Проблема ускладнюється тим, що з підвищенням робочої частоти пред'являються дедалі жорсткіші вимоги до

збереження розрахункової форми випромінюючої поверхні антени. Вид розрахункового профілю антени зазвичай відрізняється через неточність виготовлення, спотворення форми під власною вагою, а також внаслідок безпосереднього зіткнення з навколишнім середовищем, тому що піддається температурним (сезонним та добовим змінам температури, перегріву поверхні сонячним випромінюванням) і механічним, наприклад, вітровим, вібраційним чи ударним впливам. Внаслідок зазначених впливів, випромінююча поверхня антени деформується, змінюючи просторові амплітудно-фазові розподіли джерел збудження, що відповідають діаграмам спрямованості (ДС), коефіцієнт спрямованої дії (КСД) та інші характеристики антени. Це негативно впливає на характеристики радіотехнічних систем, у яких використовуються такі антени.

Через складність аналізу природи виникнення таких деформацій їх часто вважають випадковими і результат їх впливу оцінюють для сімейства вже готових антен [3], тому дуже перспективними виявляються методи математичного моделювання, що дозволяють провести аналіз впливу виробничих похибок та зовнішніх впливів на характеристики рамкових антен ще на етапі проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки з'являється все більше робіт, в яких описуються механізми та принципи проектування радіотехнічних систем з радіоканалами.

М. В. Брич [1] дослідив моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку за наявності кількох конкуруючих операторів зв'язку та високої гетерогенності технологій радіодоступу, типів пристроїв та вимог до параметрів якості передавання даних.

До питання інформаційної технології підвищення ефективності роботи базових станцій стільникового оператора підійшла О. О. Полігенько [2]. Авторкою підкреслено, що одним із головних напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових поколінь стільникових мереж зв'язку, зокрема, 5G.

Р. Одарченко, Т. Дика та Н. Дика [3] здійснили огляд проблеми функціонування систем забезпечення якості у мережах п'ятого покоління. Науковцями підкреслено, що оскільки принципи управління QoE при переході від 4G до 5G будуть збережені, основні зусилля розробників 5G повинні бути зосереджені на віртуалізації втратити зв'язок із мережею, що відповідають за управління та контроль QoE в мережі.

У [4] розглянуті сучасний стан та перспективи розвитку механізмів складових безпеки: кібербезпеки, інформаційної безпеки, безпеки інформації, та інформаційних технологій.

С. І. Князєв [5] здійснив аналіз тенденцій становлення та розвитку технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління у світі та його вплив на процеси цифровізації економіки, а також визначив перспективні практики для імплементації в умовах України.

Методи підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку дослідив П. С. Усік [6].

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Авінаш, Р. і Дабхаде, Маніш і Шривастава, Кунал і Канауджіа, Бінод [7], Джайн, Аміт і Ачарья, Рупеш і Джахар, Сародж і Мішра, Тарун [8], Факії, Халід [9], Табейді, Ранія та Масаад, Самія [10], Бойкович, Зоран і Мілованович, Драград [11], Палаццо, Марія та Сіано, Альфонсо [12], Вонг, Стен [13], Саїф, Абдулджаліл та Ісмаїл, Махамод і Нордін, Росдіаді та Абдулла Н.Ф. і Фадхіл, Мохаммед [14], Азмі, Фатін і Зубір, Фарід і Надзір, Норсаїда [15], Джаргін, Сергій [16], Шеху, Бухарі та Мубарак, Юсуф та Мустафа, Мохаммед [17] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання огляду принципів формування архітектури радіотехнічних систем з радіоканалами залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Формулювання мети дослідження. Провести огляд особливостей формування архітектури радіотехнічних систем з радіоканалами.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Найбільшого розвитку отримав математичний синтез рамкових антен: знаходження необхідних амплітудно-фазових розподілів джерел випромінювання. Однак і тут істотне опрацювання отримали лише методи розв'язання неоднорідних інтегральних рівнянь, що базуються на варіаційних підходах, методі теорії збурень, асимптотичному методі, методі апроксимацій. Хоча ці методи виявляються дуже ефективними при наближеному розв'язанні низки завдань, наприклад, задачі про відокремлену тонку антену, з їх допомогою дуже рідко можна отримати рішення з необхідною точністю для антен, що складаються з криволінійних провідників

або розташованих в безпосередній близькості від інших об'єктів, а також у разі антенної решітки. Крім того, найбільшого розвитку набули методи, засновані на середньоквадратичних підходах до синтезу антен, тоді як перспективним підходам, заснованим на рівномірному наближенні, приділено недостатню увагу. Мало уваги приділено синтезу конструкцій рамкових антен зі складним профілем в умовах зовнішніх впливів та ще менше їх оптимізації.

Проектування рамкових антен із заданими характеристиками спрямованості це складне завдання, аналітичне рішення якого в більшості випадків виявляється неможливим. У зв'язку з цим, при вирішенні такого завдання використовуються різні наближення, серед яких найбільш поширена заміна просторової діаграми спрямованості (ДС) її наближеним поданням у вигляді добутку функцій, що описують одноплосинні ДС у головних перерізах. Це справедливо, якщо діаграма спрямованості рамкової антени по азимутальних кутах має однакову форму для різних фіксованих значень кута місця θ , і навпаки. Ця умова зазвичай виконується тим точніше, чим гостріше ДС. Дзеркальні симетричні антени відносяться до гостронаправлених, тому їх просторові ДС $F(\phi, \theta)$ можуть бути приблизно представлені як

$$F(\phi, \theta) = F(\phi)F(\theta)$$

де $F(\phi)$ – ДС у горизонтальній площині;
 $F(\theta)$ – ДС у вертикальній площині.

Таким двовимірним ДС, що розділяються $F(\phi, \theta)$ відповідають і двовірні, які розділяються по розподілу поля $f(x, y)$ в декартовій системі координат, що подаються як

$$f(x, y) = f(x)f(y)$$

де $f(x)$ – розподіл поля в апертурі антени вздовж осі Ох горизонтальної площини;
 $f(y)$ – розподіл поля в апертурі антени вздовж осі Оу вертикальної площини.

Таким чином, рішення задачі синтезу рамкової антени може бути зведено до визначення амплітудно-фазового розподілу джерел збудження по ДС, заданої у відповідній площині, з урахуванням форми перерізу випромінюючої поверхні.

Зовнішні дії деформують розрахунковий профіль перерізу антени, що впливає на її характеристики спрямованості. Проте оцінити цей вплив можна лише наближеними методами.

Для різних типів мікрохвильових антен з недеформованими випромінюючими поверхнями ДС, що формуються ними, можуть бути розраховані за відомими формулами [5]. Однак такий підхід не дозволяє врахувати фазові спотворення що виникають при деформації. Перспективним тут виявляється дискретне уявлення безперервної випромінюючої поверхні та, відповідно, її перерізів як системи елементарних випромінювачів.

При такому підході напруженість електричного поля E_{Σ} , створюваного системою таких випромінювачів у точці спостереження Р є суперпозицією полів окремих випромінювачів з урахуванням амплітуд і фаз збудження джерел. Відповідно до цього для головних перерізів антени розрахунковий вираз набуде вигляду:

$$E_{\Sigma i} = \sum_{i=0}^n E_{\theta i}$$

де i – номер випромінювача;
 $n = 2N$ – число випромінювачів;
 N – максимальний порядковий номер випромінювача щодо осі z;
 $E_{\theta i}$ – складова електричного поля, що створюється випромінювачем з індексом i .

Складова електричного поля, створювана i -м випромінювачем у напрямку точки спостереження Р може бути визначена як

$$E_{\theta i} = E_{0i} * F(\theta_i) * \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}$$

де E_{0i} – амплітуда напруженості електричного поля, створюваного i -м випромінювачем у поверхні антени;

$F(\theta_i)$ – рівень діаграми спрямованості (ДС) i -го випромінювача в напрямку θ_i ;

θ_i – кут спостереження точки Р щодо нормалі до i -того елементарного випромінювача в його центрі;

$j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця;

$k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число;

λ – довжина хвилі;

r_i – відстань від центру i -го випромінювача до точки спостереження P .

В якості випромінювачів можуть бути обрані лінійні елементарні джерела електромагнітних хвиль, наприклад, такі як вібратор Герца, симетричний напівхвильовий вібратор та ін.

Для математичного опису взаємного просторового становища випромінювачів і точки спостереження необхідно поєднати центр антени O з центром кола, що має радіус, що дорівнює відстані R від цього центру до точки спостереження P . Таке коло опише радіус-вектор відстані R при повороті антени щодо напрямлення P на кут рівний 360° що відповідає умовам оцінки її характеристики спрямованості. Таким чином, для визначення параметрів, що входять до розрахункових формул можна використовувати співвідношення, що випливають з геометричних уявлень.

До розгляду прийнято антену модель якої виконана у вигляді структури друкованих провідників шириною $b = 3$ мм на підкладці із склотекстоліту ($\epsilon_r = 4,7$; $tg\delta = 0,025$). Для зменшення випромінювання антени у бік, протилежний основній зоні реєстрації, з нижньої сторони підкладки на відстані $h = 40$ мм розташований екран з розмірами 200×200 мм. У провіднику антени було зроблено 7 вирізів завдовжки $g = 3$ мм. Підстроювання реактивної частини вхідного опору антени проводиться в процесі моделювання варіюванням діаметра антени ($D = 159$ мм), довжини додаткових ліній, що утворюють конденсатор ($L_1 = 61$ мм) та відстані між додатковими лініями та основним контуром антени ($t_1 = 1,5$ мм). Слід зазначити, що в конструкції довжина окремого відрізка контуру кілька перевищила теоретичне обмеження і склала $0,17$ довжини хвилі. Необхідність цього була викликана значною довжиною додаткових ліній, що забезпечує необхідну ємність.

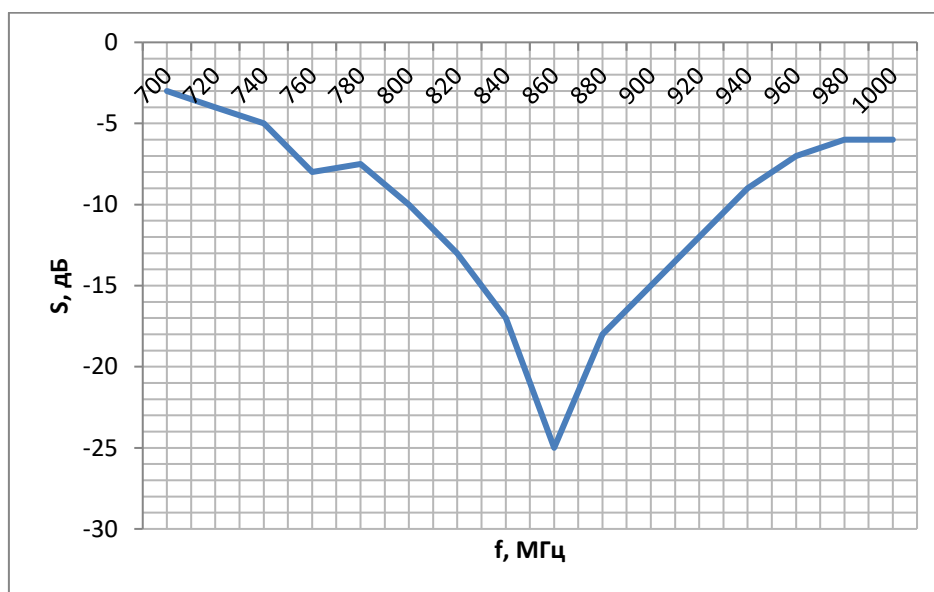


Рис. 1. Модуль коефіцієнта відбиття на вході антени

Відповідно до результатів чисельного моделювання, антена із зазначеними вище фізичними розмірами має характеристики, наведені на рисунку 1.

Центральна точка робочої лінії частот зсунута приблизно на 50 МГц щодо необхідного діапазону 865 - 870 МГц (рис. 2, графік "вимірювання").

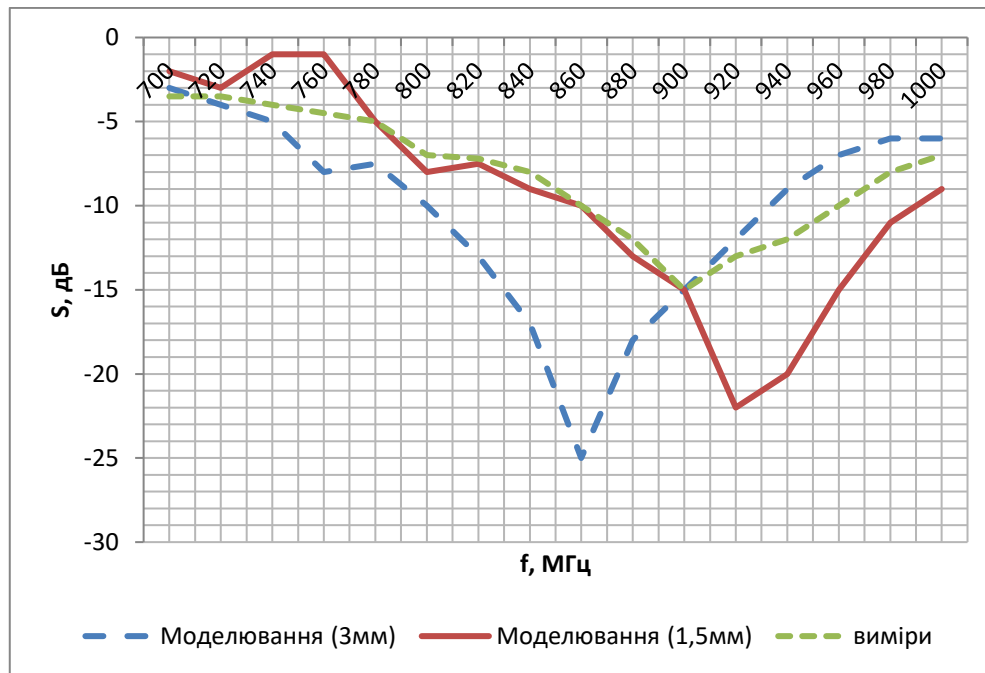


Рис. 2. Втрати для відображення на вході антени

При аналізі графіка залежності вхідного опору антени від частоти (без симетруючого трансформатора, рис. 3) було встановлено, що для зсуву резонансної частоти антени в потрібний діапазон необхідно збільшити сумарну ємність включених в ланцюг конденсаторів.

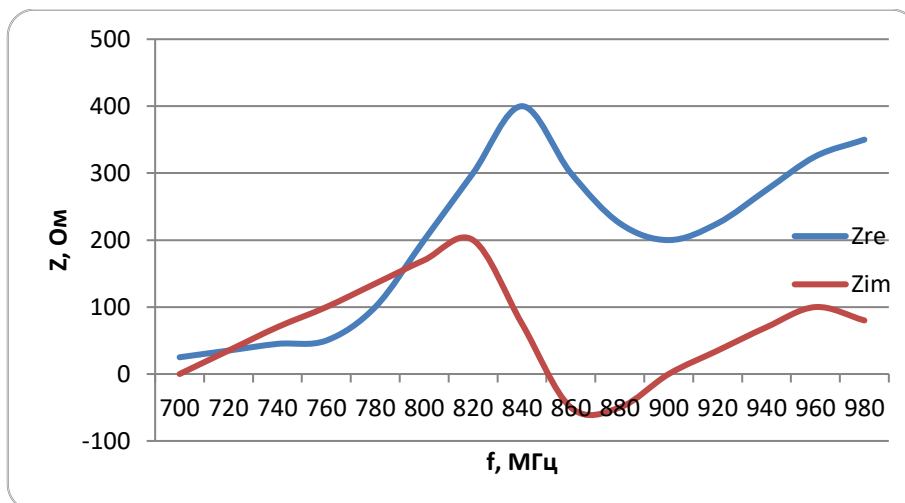


Рис. 3. Залежність вхідного імпедансу антени від частоти (без симетруючого трансформатора)

Підстроювання планарних конденсаторів може бути виконане кількома шляхами:

- 1) збільшенням довжини конденсаторних ліній;
- 2) зменшенням відстані між цими лініями та основним провідником антени;
- 3) додаванням додаткових ліній з боку, протилежного вже наявним.

Доопрацювання готової антени допускає лише останню модифікацію, то для подальшої оптимізації характеристик антени був обраний даний спосіб. В результаті реалізації даного підходу допустимий рівень узгодження в потрібному діапазоні частот було досягнуто (рис. 4, зразок 2). Для цього з внутрішньої сторони петлі необхідно розмістити додаткові конденсаторні лінії шириною $b=3$ мм, довжиною $L_2=35$ мм та відступом $t_2=1$ мм від основного провідника петлі.

В результаті виявлено значне зменшення напруженості магнітного поля у ближній зоні другого зразка антени.

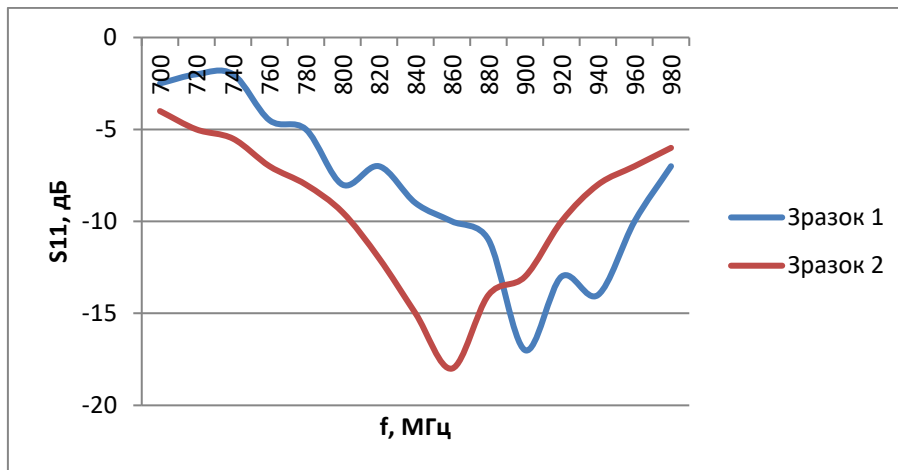


Рис. 4. Втрати на відображення на вході антени до (зразок 1) та після (зразок 2) підстроювання

Про це побічно свідчило зменшення більш ніж удвічі дистанції реєстрації міток під час використання другого зразка антени проти першого. Можливими причинами зменшення дистанції реєстрації мітки могли бути:

- 1) зміна розподілу максимумів напруженості магнітного поля над структурою антени (дистанція реєстрації міток вимірювалася лише у центральній частині антени);
- 2) значне зменшення амплітуди струму, що по периметру рамки, при включенні в конструкцію додаткових ліній.

Для виявлення дійсних причин значного погіршення характеристик другого зразка були проведені додаткові чисельні розрахунки, в результаті яких була отримана графічна залежність розподілу нормальній (по відношенню до площини антени) компоненти вектора напруженості магнітного поля X і Y (рис. 5) для двох зразків, що розглядаються.

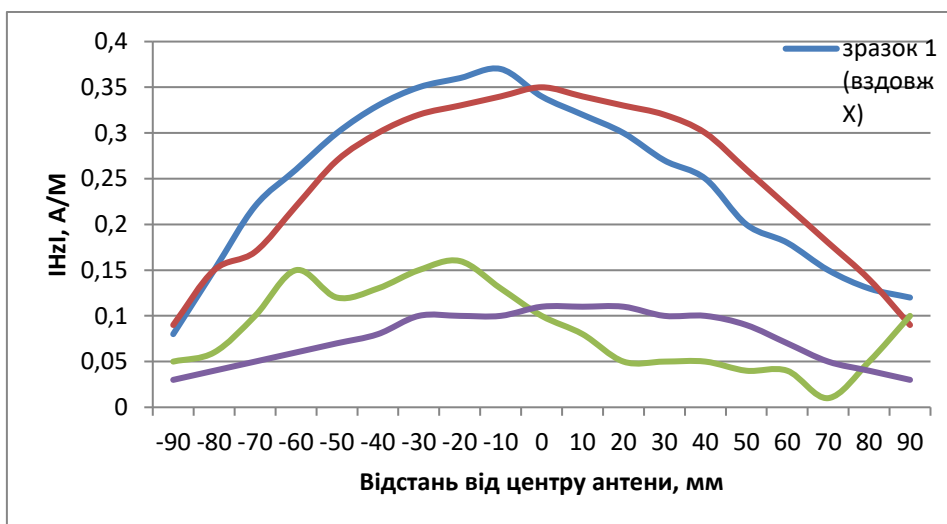


Рис. 5. Розподіл напруженості магнітного поля у ближній зоні антени (на відстані 50 мм від центру антени по осі Z)

Як видно з рисунку, незважаючи на геометрично рівномірне розташування додаткових конденсаторних ліній, їх внесення до структури призводить до значної нерівномірності у розподілі поверхневого струму по периметру рамки та суттєвому зменшенню його амплітуди в окремих зонах антени. Це, у свою чергу, згідно з графіками на рисунку 5, призводить до зменшення загальної напруженості магнітного поля та збільшення нерівномірності його розподілу вздовж осі X . В результаті точка максимуму напруженості магнітного поля зміщується від центру антени.

Для перевірки впливу взаємного розміру конденсаторних ліній, розташованих по обидва боки основного контуру рамки, на рівномірність розподілу струму по контуру антени, була додатково розглянута ситуація, коли лінії розташовувалися симетрично на відстані $t_1 = t_2 = 1,5$ мм від основного контуру петлі та мали рівні розміри $L_1 = L_2 = 37,5$ мм. Проте нерівномірний розподіл поверхневого струму по периметру антени спостерігався й у цьому випадку.

Таким чином, другий варіант конструкції конденсаторів не забезпечує необхідних характеристик і тому не може бути рекомендований до використання. З цієї причини для підстроювання вхідного опору антени був використаний інший спосіб: поблизу точки живлення в розрив основного провідника додали чіп-конденсатор ємністю $0,82$ пФ, а відстань між підкладкою і екраном зменшили до 25 мм.

Повторні вимірювання дистанції реєстрації міток виявили збереження характеристик антени при даному способі її підстроювання. Було навіть відзначено невелике збільшення дистанції реєстрації, що пояснюється покращенням узгодження антени з лінією живлення.

Висновки з даного дослідження та перспективи подальших досліджень. У статті проведено огляд особливостей формування архітектури радіотехнічних систем з радіоканалами. Описано принципи моделювання та підстроювання антени. З результатів моделювання слідує, що описана антена має дуже низький рівень випромінювання з кросполяризацією, який визначається, в основному, точністю виготовлення і симетрування антени, має КНД $7 \dots 8$ дБ, ширину головної пелюстки ДН близько 70° в Е-площині і 86° Н-площини. Відносна смуга частот антени, у якій забезпечується $K_{СВ\text{МАХ}}=1,3\dots 2,0$, становить $(24\dots 54)\%$, що більш ніж на 10% більше, ніж у аналогів.

Перспективами подальших досліджень є розробка макету антени та проведення натурних досліджень.

Список бібліографічного опису

1. Брич, М. (2018). В. Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 Телекомунікації та радіотехніка). Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів
2. Полігенько, О.О. (2019). Інформаційна технологія підвищення ефективності роботи базових станцій стільникового оператора. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». Національний авіаційний університет, Київ, 172 с.
3. Одарченко, Р. Дика., Т., Дика Н. (2021). Проблеми Оцінка QoE для різних випадків використання 5G / кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем: Збірник матеріалів доповідей та тез; м. Київ, 15-16 квітня 2021 року р.; Київський національний університет імені Тараса Шевченка / Редкол.: О.К. Закусило. (голова) та ін. К.: ВПЦ «Київський університет». С. 20-21.
4. Кібербезпека та інформаційні технології: монографія. – Х.: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2020. 380 с
5. Князев С.І. (2021). Мобільний зв'язок п'ятого покоління та його місце у трансформаційних процесах цифровізації економіки. *Економіка промисловості*, 1(93), 46–59.
6. Усік, П.С. (2021). Методи підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія». – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 154 с.

References

7. Avinash, R. & Dabhade, Manish & Srivastava, Kunal & Kanaujia, Binod. (2019). Antenna Design For Fifth Generation (5G) Applications. 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738212.
8. Jain, Amit & Acharya, Rupesh & Jakhar, Saroj & Mishra, Tarun. (2018). Fifth Generation (5G) Wireless Technology "Revolution in Telecommunication". 1867-1872. 10.1109/ICICCT.2018.8473011.
9. Fakieh, Khalid. (2015). The Concept of Fifth Generation (5G) Mobile Technology. Communications on Applied Electronics. 2. 45-48. 10.5120/cae2015651853.
10. Tabeidi, Rania & Masaad, Samia. (2019). Survey based on Fifth Generation (5G) in wireless network. https://www.researchgate.net/publication/337683154_Survey_based_on_Fifth_Generation_5G_in_wireless_network
11. Bojkovic, Zoran & Milovanovic, Dragorad. (2017). A Technology Vision of the Fifth Generation (5G) Wireless Mobile Networks. 25-43. 10.1007/978-3-319-52171-8_2.
12. Palazzo, Maria & Siano, Alfonso. (2021). Fifth-generation (5G) communication networks and sustainability: A research agenda. CORPORATE GOVERNANCE AND RESEARCH & DEVELOPMENT STUDIES. 55-73. 10.3280/cgrds1-2021oa10459.
13. Wong, Stan. (2019). The Fifth Generation (5G) Trust Model. 10.1109/WCNC.2019.8885697.

14. Saif, Abduljalil & Ismail, Mahamod & Nordin, Rosdiadee & Abdullah, N.F. & Fadhil, Mohammed. (2021). Opportunities and Challenges for Deploying Relays in the Fifth Generation (5G) Network Wireless. International Journal of Scientific & Technology Research. 9.
15. Azmi, Fatin & Zubir, Farid & Nadzir, Norsaidah. (2019). Millimeter Wave Fifth Generation (5G) Antenna for Smartphone Application. ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering. 18. 44-48. 10.11113/elektrika.v18n2.163.
16. Jargin, Sergei. (2022). Fifth generation (5G) telecommunication systems and human health (The article in Russian). 59-70. 10.33920/med-03-2201-06.
17. Shehu, Buhari & Mubarak, Yusuf & Mustapha, Mohammed. (2020). The Health Effects of the Fifth Generation (5G) of Cellular Mobile Communications.