

Сідень Сергій Віталійович



УДК 621.396.67

**ПОЗАСМУГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОХВИЛЬОВИХ
ВИПРОМІНЮВАЧІВ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ
ШИРОКОСМУГОВИХ ПЛАНАРНИХ АНТЕН**

05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Цалієв Тамерлан Амранович,
Одеська національна академія зв'язку
ім. О.С. Попова, професор кафедри
телебачення та радіомовлення

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кошевий Віталій Михайлович,
національний університет «Одеська морська академія»,
зав. кафедрою морського радіозв'язку

кандидат технічних наук, доцент
Хруслов Максим Михайлович,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна, доцент кафедри електроніки та
управляючих систем.

Захист відбудеться 16 грудня 2020 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.816.02 в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова, за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1, ауд. 223.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

Автореферат розісланий 13 листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доц.



М.В. Рожновський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток та поява нових систем радіозв'язку веде до освоєння нових частотних діапазонів та/або використання однієї смуги декількома радіослужбами одночасно. Цей факт призводить до значного росту електромагнітних полів, що у результаті погіршує електромагнітну обстановку та, відповідно, якісні показники таких систем.

У багатьох випадках, на обмеженій території використовується велика кількість різноманітних систем радіозв'язку, та відповідно, антен, що перекривають необхідні радіочастотні діапазони. Це призводить до двох задач: необхідності врахування взаємного впливу антен, які функціонують на різних частотах, тобто врахуванню позасмугових характеристик антен, а також розробці нових типів малорозмірних (компактних) широкосмугових конструкцій, що зможуть замінити собою одразу декілька антен, що перекривають суміжні частотні діапазони та, відповідно, зменшити необхідну площу для їх розміщення.

Роботи присвячені аналізу позасмугових характеристик антен почалися у 1970-х роках у США, але літератури з даної тематики досить мало. Значний внесок був вкладений такими вченими: Кременецький С.Д., Єршов Л.І., Ваксенбург С.І., І.М. Поліщук, І.Г. Швайко, О.Л. Бузов, В. J. Cown, E. B. Joffe, D.A. Hill та іншими. Розробкою та аналізом широкосмугових антен займалося багато вчених до яких треба віднести: Д.І. Воскресенський, С. Balanis, S.H. Choi, B. Allen, T. Rappaport та ін.

Таким чином аналіз та покращення частотних та спрямованих характеристик у широкій смузі частот є **актуальною науково-технічною задачею**, розв'язання якої дозволить значно підвищити показники систем радіозв'язку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Частина досліджень, представлених в дисертаційній роботі, є складовою науково-дослідних робіт, що проводяться на кафедрі телебачення та радіомовлення Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова, у тому числі наукова робота «Новітня концепція управління та передавання інформації із застосуванням адаптивних технологій в каналах відеозв'язку військово-цивільного призначення» фінансована Міністерством освіти і науки України №ДР 0117U006808.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є аналіз частотних характеристик антен у широкій смузі частот та розробка широкосмугових планарних антен. Відповідно до мети роботи ставляться наступні завдання наукових досліджень:

1. Провести критичний аналіз літератури, стосовно частотних та спрямованих характеристик антен, методів аналізу впливу спрямованих характеристик у задачах електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, та

вивчення основних особливостей ширококугових антенних конструкцій.

2. Проаналізувати на основі комп'ютерного моделювання основні позасмугові характеристики поширених типів антен (лінійна антенна решітка, панельна антена базових станцій мобільного зв'язку, мікросмужковий випромінювач)

3. Розробити математичну модель для коректного врахування позасмугового рівня коефіцієнта підсилення антен у областях бокового та заднього випромінювання.

4. Розробити нові конструкції ширококугових малорозмірних планарних антен та провести комп'ютерний аналіз їх основних характеристик.

5. Провести експериментальні дослідження характеристик запропонованих антен для підтвердження достовірності отриманих результатів

Об'єктом досліджень є електромагнітні процеси, що відбуваються при випромінюванні антенами у широкій смузі частот.

Предметом досліджень є частотні та спрямовані характеристики антен у широкій смузі частот.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі використовується математичний апарат електродинаміки, методи теорії антен та пристроїв надвисоких частот, низькочастотні методи обчислювальної електродинаміки (метод моментів), а також методи експериментального дослідження частотних та спрямованих характеристик антен у натурних умовах.

Наукова новизна визначається наступними результатами, що отримані у дисертації:

1. Вперше отримані частотні залежності основних електродинамічних характеристик поширених типів антен у широкій смузі частот, які дозволяють коректно враховувати чисельні значення позасмугового рівня КП у задачах аналізу електромагнітної обстановки.

2. Вперше запропонована математична модель для аналізу позасмугового рівня КП антен, яка відрізняється від існуючих тим, що дозволяє проводити аналіз його значення у конкретному секторі кутів.

3. Дістав подальшого розвитку метод розрахунку КП антен за межами смуги робочих частот, який враховує частотну залежність коефіцієнта відбиття на вході антени.

4. Вперше представлена низка оригінальних топологій ширококугових малорозмірних антен, особливістю яких є їх периферійне збудження, що не порушує планарність конструкції. На підставі комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження доведено можливість їх практичного використання.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена комп'ютерна модель для аналізу позасмугового рівня коефіцієнта підсилення антен у заданому секторі кутів, яка дозволяє адекватно проводити оцінку характеристик антен у задачах ЕМС РЕЗ.

2. Розроблені принципово нові конструкції та виготовлені моделі малорозмірних планарних широкосмугових антен. Відносна ширина смуги робочих частот таких антен знаходиться у межах від 50% до 120% (для різних модифікацій) як за вхідним опором, так і за характеристиками спрямованості. Характерною особливістю даних конструкцій є їх периферійне збудження, що не порушує планарність.

3. Отримані наукові результати відображені у матеріалах науково-дослідних робіт молодих вчених та впроваджені в навчальний процес на кафедрі технічної електродинаміки та систем радіозв'язку Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова.

4. Розроблений макет для дослідження позасмугових характеристик лінійної антенної решітки, що може бути використаний у навчальному процесі.

Практична цінність результатів, отриманих у дисертаційній роботі підтверджуються відповідними актами впровадження, що отримані у Одеській національній академії зв'язку.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є науковим дослідженням, що проведено особисто автором. З опублікованих у співавторстві результатів в дисертаційній роботі використані тільки ті, які отримані автором особисто. До даних результатів можна віднести роботи та відзначити особистий внесок здобувача: [1, 11, 12] та [5, 9] – проведено аналіз частотних та спрямованих характеристик лінійної антенної решітки та мікросмушкового випромінювача за межами робочого діапазону частот, відповідно; [2 – 4, 6 – 8, 10, 17, 19, 20] – опис топологій запропонованих конструкцій широкосмугових планарних антен, проведення чисельного моделювання та опис отриманих результатів; [13 – 16, 18] – проведення досліджень та опис отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися на наступних міжнародних та всеукраїнських конференціях:

- IX, X International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT (2013, 2015 pp.),

- 2016 та 2018 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET (Lviv, 2016; Kyiv, 2018),

- 2nd and 3rd International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Kharkiv, 2016; Lviv, 2017),

- IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON (Kyiv, 2017),
- 2nd International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2017, (Odesa, 2017),
- 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 (Lviv-Slavske, 2018),
- Міжнародна науково-практична конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка у технологічних процесах» (Одеса, 2015, 2018, 2019)

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень було опубліковано 20 наукових праць, зокрема 5 статей в спеціалізованих виданнях, що входять у переліку наукових фахових видань України, 1 стаття у закордонному виданні та 10 тез доповідей, що індексовані науково-метричними базами Scopus та Web Of Science. Отримано 1 патент на винахід та 1 на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Загальний обсяг дисертації складає: 156 сторінок комп'ютерного тексту, у тому числі: 66 рисунків, 12 таблиць. Список використаних джерел містить 85 найменувань на 9 сторінках, додатки представлені на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульовані мета та завдання, об'єкт і предмет досліджень, відзначений зв'язок роботи з науковими програмами та темами та особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію результатів дослідження, перелік наукових праць та приведена структура роботи.

У **першому розділі** дисертаційної роботи – «Математичні методи аналізу впливу характеристик антен у задачах ЕМС РЕЗ» – проведено аналіз сучасного стану розвитку математичних моделей, що використовуються для врахування частотних та спрямованих характеристик антен у задачах електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів та особливості розробки широкосмугових антен.

Відомо, що з 30 основних параметрів, які впливають на електромагнітну сумісність, третина визначається антенною системою. У роботі показано, що на даному етапі розвитку моделей оцінки електромагнітної обстановки, існує велика кількість моделей для врахування характеристик антен. Проте дані моделі можуть бути використані лише для робочої смуги частот. У разі одночасної роботи різноманітних систем на близькій відстані на різних частотах або при наявності небажаного випромінювання передавачів також необхідно брати в ува-

гу значення коефіцієнта підсилення антени не тільки у робочій смузі частот, а й за її межами. Частіше за всього така інформація є відсутньою.

У задачах аналізу позасмугового коефіцієнта підсилення діаграму спрямованості розбивають на дві частини: область головної пелюстки діаграми спрямованості (ГПДС) та область небажаного випромінювання, тобто області бокового та заднього випромінювання (рис. 1). На даний час існують математичні моделі лише для оцінки позасмугового рівня КП в області ГПДС, у той час коли дані для області небажаного випромінювання є відсутніми.

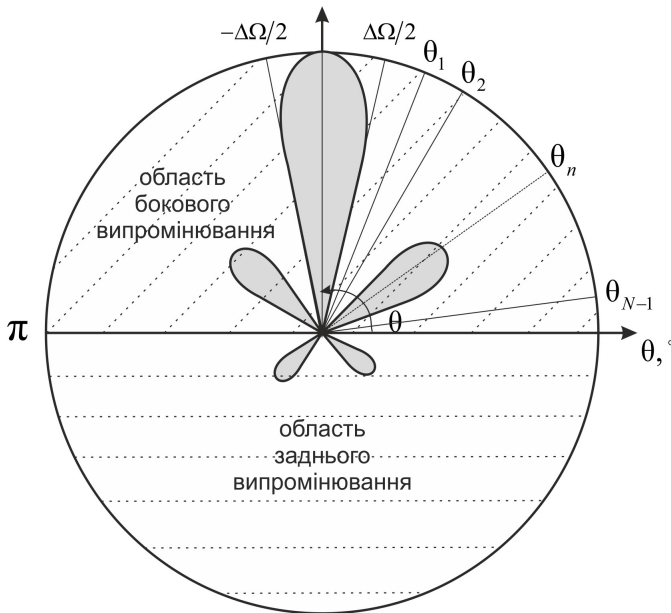


Рис. 1 – Оцінка спрямованих характеристик антен у задачах ЕМС РЕЗ

Тому існує необхідність врахування характеристик антен також в області бокового та заднього випромінювання. Через це у роботі запропонована модель для врахування позасмугового рівня коефіцієнта підсилення для області бокового та заднього випромінювання.

$$G_s = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N S(\theta), \quad (1)$$

$$S(\theta) = \frac{1}{\Delta} \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} F(\theta) d\theta, \quad (2)$$

де Δ – крок оцінки, який визнача-

ється як: $\Delta = \frac{\pi - \frac{\Delta\Omega}{2}}{N}$, де $\Delta\Omega$ – ширина ГПДС; N – кількість областей розбит-

тя; $\theta_n = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\Omega}{2} - \Delta \cdot n$; $n = 0, 1, \dots, N$; $F(\theta)$ – амплітудна характеристика спрямованості досліджуваної антени.

Через дані особливості, у роботі показані основні причини зміни частотних та спрямованих характеристик антен зазначена необхідність, щодо їх врахування при аналізі електромагнітної обстановки та при задачах зменшення коефіцієнта зв'язку між антенами.

Крім того, сформульовано задачу розробки нових типів компактних конструкцій антен, що мають широкосмугові властивості, як за вхідним опором, так і за характеристиками спрямованості, що можуть бути використані у задачах забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.

У **другому розділі** дисертаційної роботи – «Позасмугові характеристики поширених типів антен» – представлені результати аналізу основних електро-

динамічних характеристик поширених типів антен у широкій смузі частот, що можуть бути використаними при аналізі електромагнітної обстановки.

Для аналізу позасмугових частотних та спрямованих характеристик антен було використано САПР для чисельного електродинамічного моделювання *FEKO*, що базується на використанні методу моментів (Method of Moments) реалізованого у частотній області:

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle \psi_n L(f_n) \rangle \approx \langle \psi_n g \rangle \quad (3)$$

Формула (3) являє собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно невідомих коефіцієнтів a_n . Після рішення СЛАР та знаходження a_n , ми можемо автоматично знайти невідому функцію f . Метод моментів, реалізований у програмних комплексах вирішення електродинамічних задач дозволяє звести операторну задачу до вирішення СЛАР, яку ефективно вирішує комп'ютер.

Першим кроком був аналіз частотних характеристик *лінійної еквідистантної антенної решітки* (ЛАР).

При розрахунку коефіцієнта підсилення антени $G(f) = D(f)\eta(f)$ у широкій смузі частот, слід розуміти, що при розрахунку ККД антени необхідно брати до уваги не тільки теплові втрати антени, але й той факт, що енергія, яка підводиться до антени може бути відбита, через неузгодженість між антеною та фідером. Для оцінки ефективності антени у широкій смузі частот, можна використати наступний вираз, що зв'язує частотні залежності ККД $\eta(f)$ та комплексного коефіцієнта відбиття на вході антени $\Gamma(f)$:

$$\eta(f) = 1 - |\Gamma(f)|^2.$$

Порівнюючи частотні залежності КСД та КП антени (рис. 2) видно, що враховуючи неузгодженість вхідного імпедансу антени та лінії живлення, спостерігаються помітні значні зміни частотних залежностей КСД та КП за межами робочої смуги частот.

Зокрема, рівень КП на частотах, що відповідають парним гармонікам розрахункової частоти, де мають місце максимальні значення ККД, зменшується або навіть знижується до нуля (4-а та 8-а гармоніки). Крім того, характер частотної залежності КП ЛАР практично не залежить від повздовжньої кількості елементів антенної решітки. Хоча при зміні частоти також змінюється відносні розміри решітки та з'являються бокові пелюстки діаграми спрямованості, мак-

симальне значення КП у напрямку нормалі спостерігається тільки у на робочій частоті ЛАР $f = 1$ ГГц.

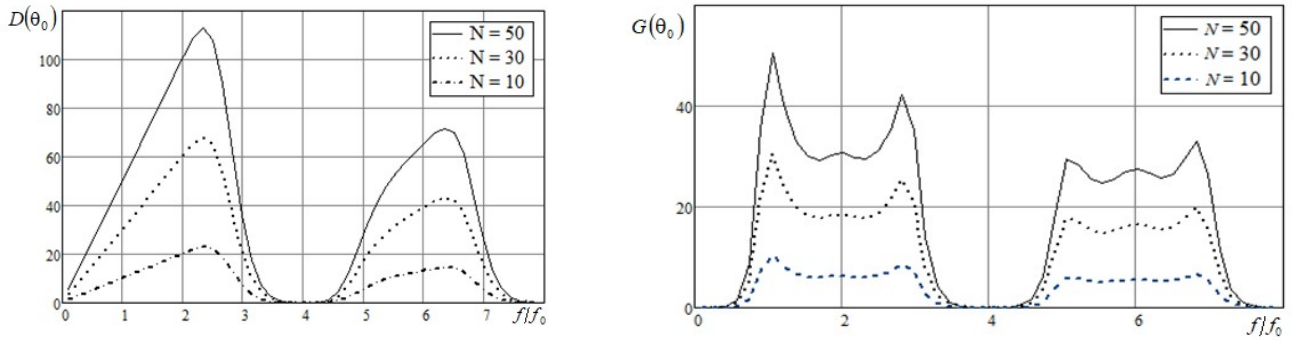


Рис. 2 – Частотні залежності КСД та КП еквідистантної антенної решітки з напівхвильових диполів від частоти

ЛАР на основі симетричних диполів є одним з найпростіших варіантів виконання антенної решітки. При використанні інших антенних елементів та екрануючих елементів аналіз стає більш складним та непередбачуваним. Тому, далі розглянуто один з варіантів розповсюджених типів антен – панельну антену базових станцій мобільного зв'язку (рис. 3).

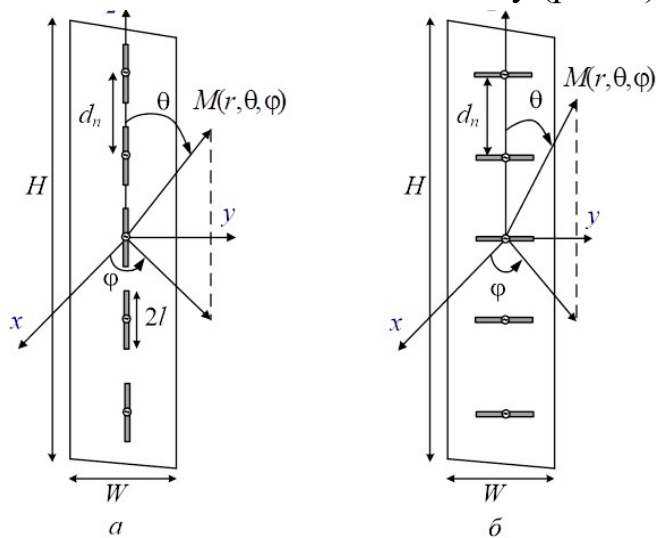


Рис. 3 – Досліджувані моделі панельних антен $f_0 = 1$ ГГц.

Плоский ідеально провідний екран, прямокутної форми з шириною $W = 0,75\lambda_0$ та висотою $H = 4\lambda_0$, розміщується на відстані $d_e = 0,25\lambda_0$ від системи симетричних вібраторів.

Приведені нижче дослідження та їх аналіз здійснювався на дискретних частотах у діапазоні від 1 до 6 ГГц з кроком 100 МГц.

При розгляді частотних властивостей панельної антенної решітки з п'яти елементів, необхідно звернути увагу на те, що з ростом частоти з'являються побічні головні максимуми діаграми спрямованості. Тому при аналізі частотних

Кожна з моделей являє собою синфазну лінійну еквідистантну антенну решітку, що складається з 5 випромінюючих елементів та металевого екрана (рефлектора). Елементами такої решітки обрані напівхвильові симетричні вібратори довжиною $2l \approx \lambda_0 / 2$, де λ_0 довжина хвилі у вільному просторі, що відповідає частоті

залежностей КСД (рис. 4) та КП (рис. 5) необхідно розглядати не тільки зміну величини у напрямку нормалі до екрана D_0 , але й в напрямку одного з побічних головних пелюсток, тобто їх максимальних значень D_{\max} .

Оскільки вхідний імпеданс кожного елементу решітки залежить від зміни частоти, з урахуванням взаємного впливу елементів один на одного, орієнтації та наявності рефлектора, то для урахування всіх цих факторів було проведено розрахунок вхідного імпедансу для центрального елемента решітки. У результаті стало відомо, що на частоті резонансу активна частина імпедансу при різній орієнтації дещо відрізняється, та приблизно дорівнює 63 Ом для AP1, та 75 Ом для AP2. У подальших розрахунках ці значення були прийняті такими для всіх елементів відповідної решітки, щоб можна було прийняти їх узгодженими з навантаженням на робочій частоті 1 ГГц.

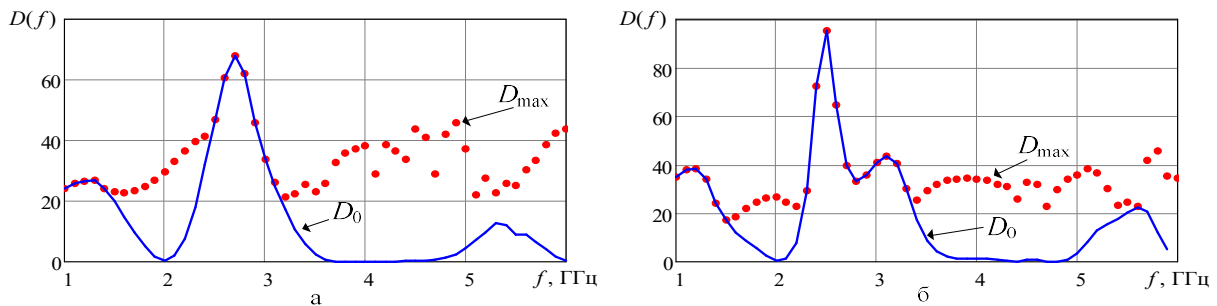


Рисунок 4 – Залежність КСД панельних AP від частоти: а – AP1, б – AP2.

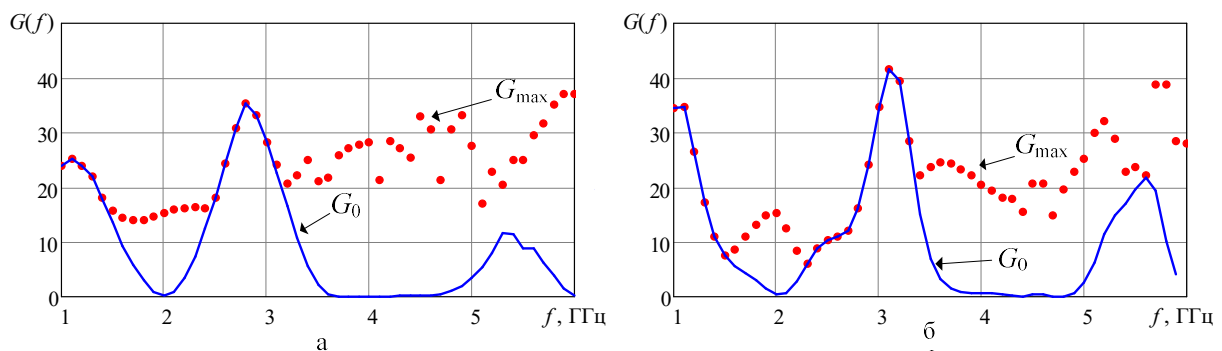


Рисунок 5 – Залежність КП панельних AP від частоти: а – AP1, б – AP2

Порівнюючи дані залежності, треба відмітити, що у наслідок не узгодження антени з лінією живлення, за межами робочої смуги частот спостерігається майже двократне зменшення значень КП у порівнянні з КСД. При цьому, у випадку моделі AP2, оскільки взаємний вплив елементів антенної решітки є значно більшим, спостерігається зміна форми кривої в області 3-ї гармоніки та зміщення його максимуму.

Найбільш компактними та ефективними антенними конструкціями у діапазоні надвисоких частот є мікросмужкові антени. У дисертаційній роботі проаналізовані позасмугові характеристики мікросмужкового випромінювача прямокутної форми.

Для досягнення мети була побудова електродинамічна модель з вихідними даними: робоча частота $f = 3$ ГГц, висота $h = 2$ мм та діелектрична проникність підкладки $\varepsilon_r = 2,3$.

В мікросмушкових лініях збуджуються моди типу TM_{mnp} для яких резонансна частота визначається наступним виразом:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2},$$

Для прямокутного випромінювача основний тип хвилі TM_{010} для якої резонансна частота визначається як

$$f_{010} = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}.$$

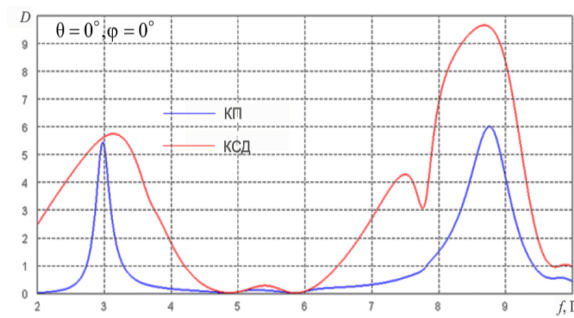


Рисунок 6 – Частотна залежність КСД та КП мікросмушкової антени від частоти

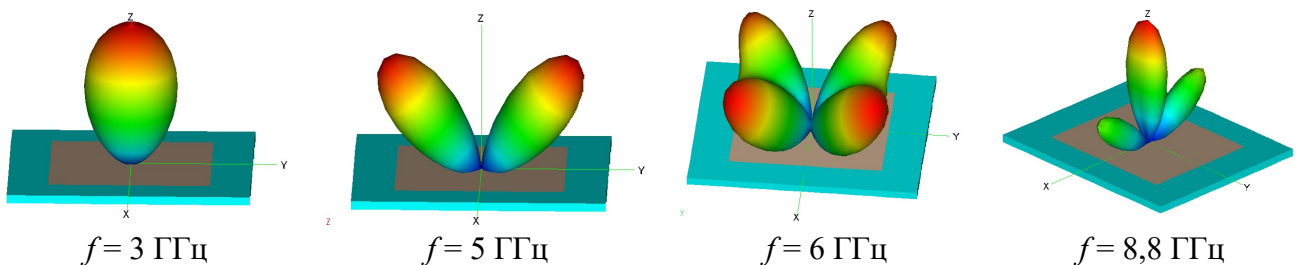


Рисунок 7 – Діаграми спрямованості МСА на різних частотах

З отриманих результатів випливає, що характеристики спрямованості патч-антени за межами робочого діапазону частот істотно змінюються. Водночас спостерігається добре узгодження антени з лінією живлення на всіх резонансних частотах. Отже, на резонансних частотах вищих мод можливе випромінювання (або приймання) небажаних сигналів, частоти яких знаходяться за межами робочого діапазону.

Виходячи з цього можна зробити висновок, що при аналізі ЕМС радіоелектронних засобів за межами робочого діапазону частот необхідно більш правильно враховувати умови виникнення вищих типів хвиль в мікросмушковій антені. Результати дослідження дозволили наочно продемонструвати особливості частотних та спрямованих характеристик та встановити чисельні значення

характеристик мікросмушкової антени від частоти у напрямку нормалі до екрана антени. Дана залежність має два максимуми на робочій частоті 3 ГГц та на частоті 8,8 ГГц. На інших резонансних частотах (5 та 6 ГГц) випромінювання у даному напрямку майже відсутнє.

Такий характер даної залежності пояснюється значною зміною спрямованих характеристик, що проілюстровано на рис. 7.

коефіцієнта підсилення та характер його зміни поза смугою робочих частот, що представляє особливе значення при розв'язанні задач ЕМС.

У **третьому розділі** – «Моделювання та дослідження характеристик широкосмугових планарних антен для задач аналізу ЕМС РЕЗ» – запропоновані нові топології компактних антенних конструкцій, що мають широкосмугові властивості як за вхідним опором, так і за спрямованими характеристиками. Такі антени можуть бути використані у задач ЕМС РЕЗ для проведення вимірювань рівнів електромагнітних коливань у широкому діапазоні, або у якості еталонних антен для компактних (малогабаритних) безехових камер.

Широкасмугова планарна спіральна антена з периферійним збудженням. Особливістю запропонованої конструкції є те, що спіральний елемент розміщується у коловому отворі радіуса R_1 (та зміщений відносно його центра) у плоскому добре провідному екрані, який може бути прямокутної або квадратної форми. Геометрія даної конструкції антени представлена на рис. 8.

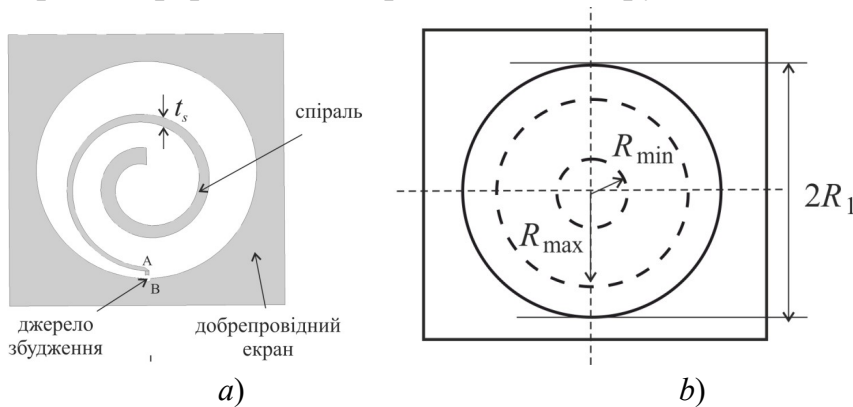


Рисунок 8 – Геометрія моделі антени

Збудження антени здійснюється у периферійній області спіралі за допомогою коаксialної або копланарної ліній (які розміщуються у площині екрану), при цьому спіральний елемент зміщений

так, що відстань між точками збудження (від краю периферійного витка до краю отвору) приблизно дорівнює ширині смужки спірального елемента. При цьому геометрія антени є такою, що всі її елементи розміщені в одній площині – це і є характерною особливістю такої конструкції.

Результати моделювання основних характеристик запропонованої конструкції зображені на рис. 9 (залежність КСХ) та рис. 10 (залежність КСД).

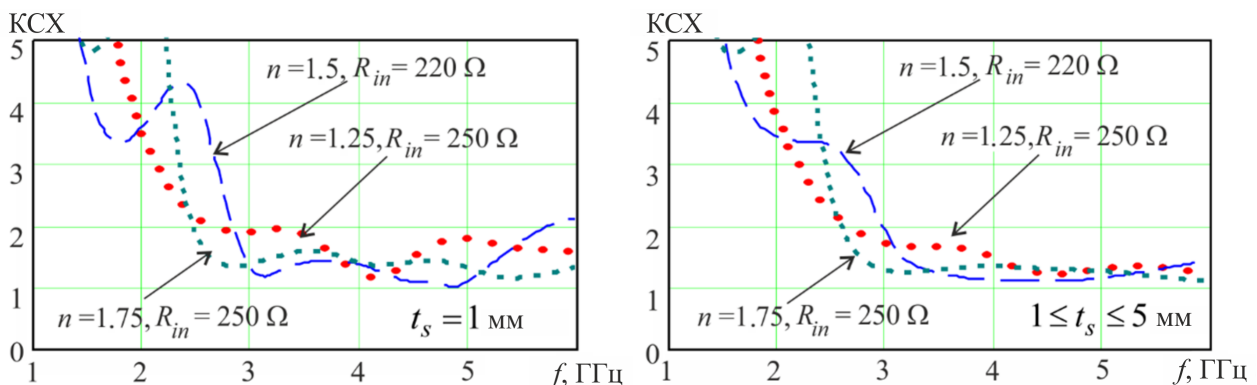


Рисунок 9 – Частотна залежність КСХ антени

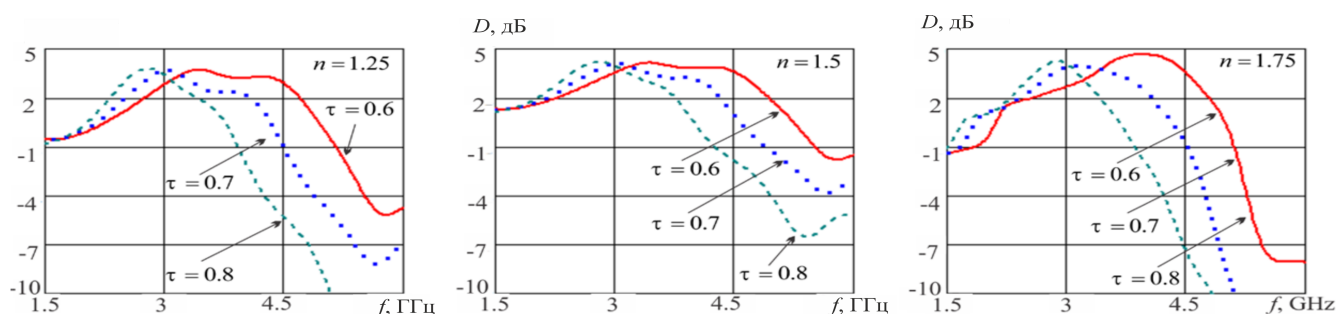


Рисунок 10 – Частотна залежність КСД антени

Основні електродинамічні характеристики для декількох конструктивних варіантів антен, що відрізняються числом витків, і в тому числі – з постійною і змінною шириною стрічки спірального елемента. Як показали результати чисельного аналізу, величина відносної ширини смуги робочих частот знаходиться у межах 75...120%.

Диск-щілина антена. Наступним типом запропонованих широкосмугових антен є диск-щілинна антена (ДЩА). При чисельному аналізі були розглянуті конструкції в основі яких лежить плоский добре провідний екран товщиною 0,05 мм з коловим отвором радіусом R_1 в площині якого знаходиться дисковий елемент радіусом R_2 . Диск зміщений таким чином, що між краями отвору та диском утворена щілина зі змінною шириною та мінімальним поперечним розміром d (рис. 11,а). У цьому місці диск з'єднаний з центральним провідником копланарної лінії. Ширина t_0 цього провідника приблизно дорівнює ширині щілини у місці його підключення, а поперечний розмір самої копланарної лінії t_s дорівнює 2,5 мм.

Вся конструкцій (екран, диск, лінія живлення, рис. 11, б) розміщується на підкладці у вигляді слою діелектрика з малими втратами $h = 1$ мм та відносною діелектричною проникністю $\varepsilon = 2,5$ (у даному випадку був обраний фторопласт).

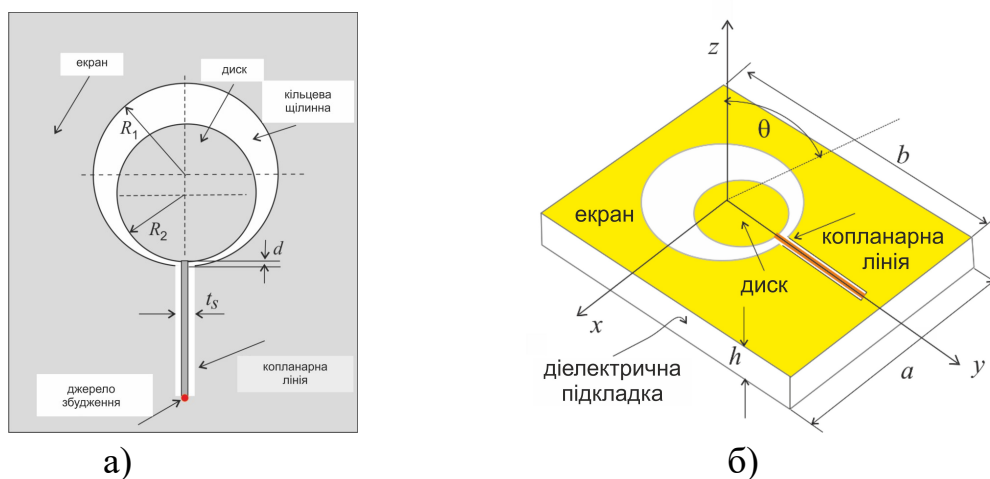


Рисунок 11 – Геометрична конфігурація ДЩА

Такий підхід дозволяє визначити амплітудно-фазове розподілення струмів на сегментних елементах та дає можливість коректно визначити частотні залежності імпедансу та модуля коефіцієнта відбиття $|S_{11}|$ на вході антени, а також характеристики випроміненого поля у дальній зоні та КСД.

В приведених далі результатах чисельного моделювання, частота джерела збудження антен змінювалась у діапазоні від 2 ГГц до 7,5 ГГц (крок був обраний 50 МГц), при цьому довжина сторони сегмента розбиття Δl була обраною такою, щоб забезпечувалась необхідна точність на вищих частотах робочого діапазону.

На рис. 12 зображені частотні залежності $|S_{11}|$ на вході антени при живленні копланарною лінією показані, де цифрами позначено: 1 – проміжок $d = 2$ мм, підкладка відсутня; 2 – проміжок $d = 2$ мм, ϵ підкладка; 3 – проміжок $d = 1$ мм, ϵ підкладка. Товщина діелектричної підкладки (при її наявності) дорівнює 1 мм.

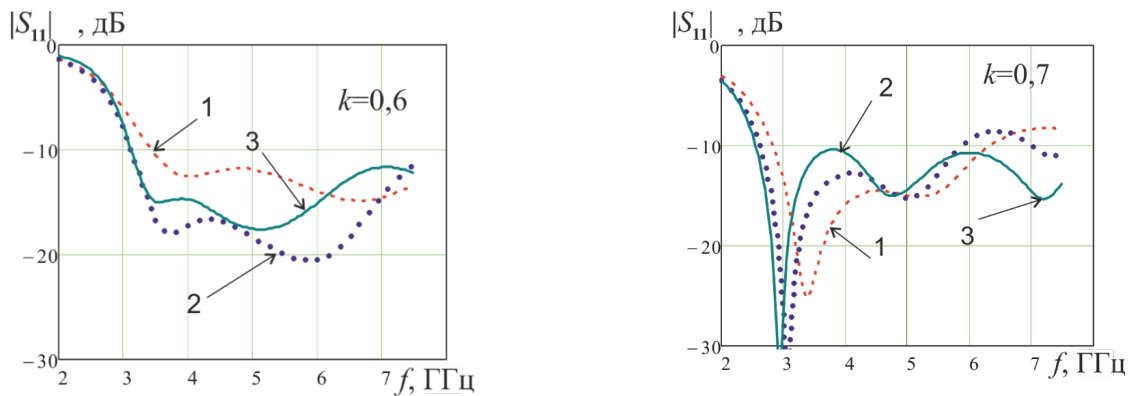


Рисунок 12– Частотна залежність $|S_{11}|$ копланарної ДЩА

Характеристики спрямованості досліджуваних моделей антен ілюструють графіки частотних залежностей КСД у напрямку нормалі до площини екрану, зображені на рис. 13. Аналізуючи ці криві, помітно значне зниження КСД на високочастотному краю діапазону.

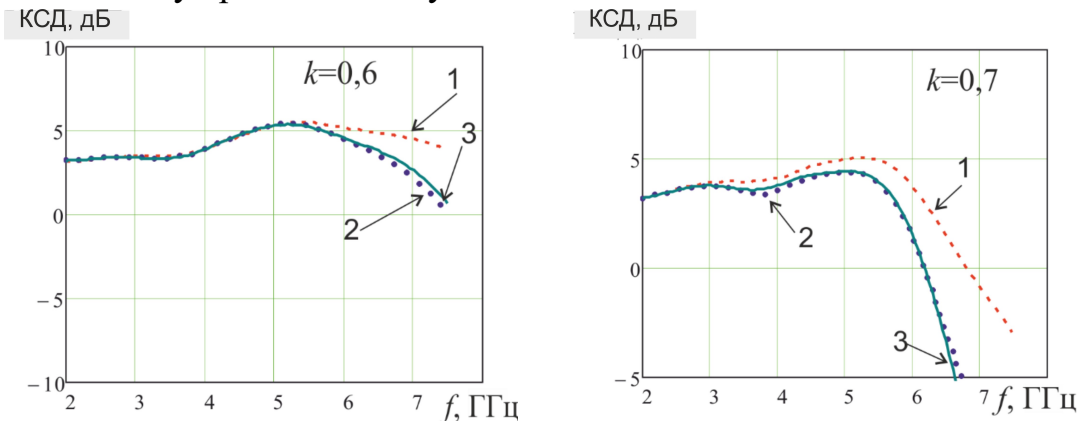


Рисунок 13 – Залежності КСД ДЩА з копланарним живленням від частоти

Характерною особливістю розглянутої антени є відхилення головної пелюстки ДС від нормалі. При цьому величина цього відхилення залежить від частоти та лежить у межах $\pm 30^\circ$ (рис. 14).

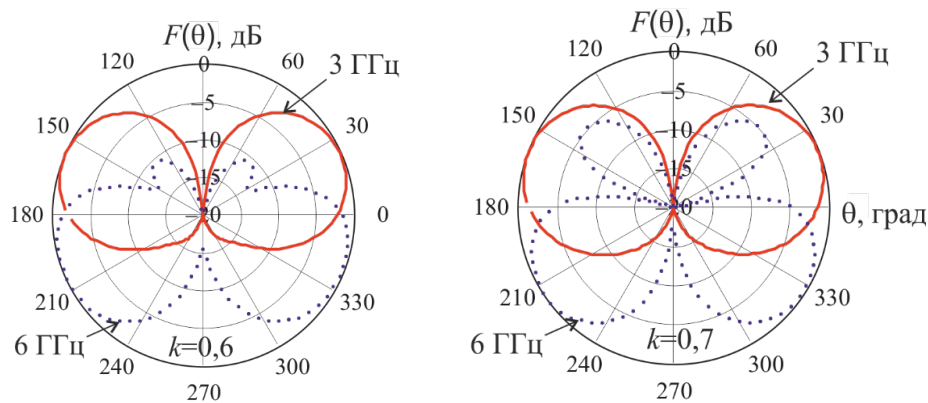


Рисунок 14 – Діаграми спрямованості ДЩА

Живлення копланарною лінією є відмінною рисою даної антени яка зберігає планарність конструкції у цілому. Антени наведеної топології належать до класу широкосмугових, оскільки для них відносна ширина смуги робочих частот $(f_{\max} - f_{\min})/f_{\text{cp}}$, як за узгодженням, так і за характеристиками спрямованості, досягає 120%.

При цьому треба відзначити, що периферійне збудження елемента випромінювання дає переваги такої антени для застосування на більш високих частотах, наприклад, в смугах частот перспективних радіосистем.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи – «Експериментальне дослідження характеристик широкосмугових планарних антен» – наведений опис основної апаратури та методики вимірювання основних характеристик запропонованих антен, представлені отримані результати натурних експериментів, та приведено їх порівняння з розрахунковими (чисельними) результатами.

На рис. 15 представлена електрична структурна схема для дослідження коефіцієнту відбиття виготовленої диск-кільцевої антени (рис. 16).

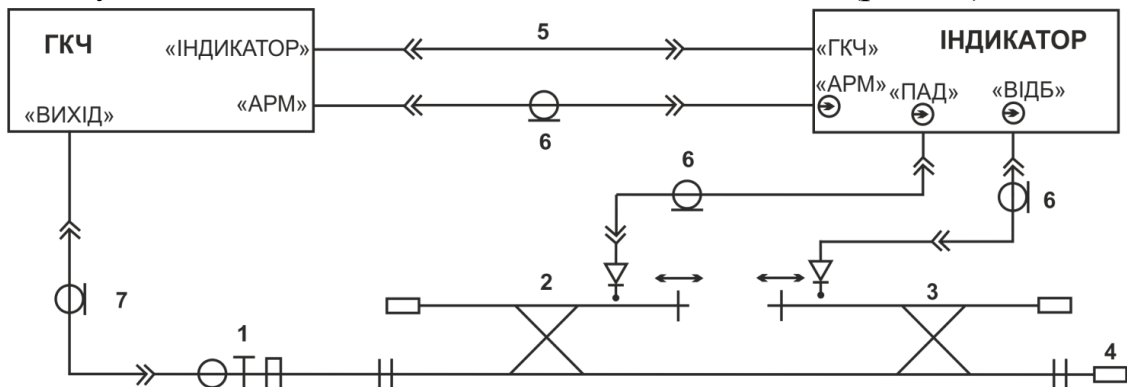


Рисунок 15 – Структурна схема вимірювань



Рисунок 16 – Виготовлена антена

Для проведення вимірювань було використано панорамний вимірювач коефіцієнту стоячих хвиль (КСХ) P2-58, призначений для вимірювання і відтворення на екранах ЕПТ частотних характеристик КСХ.

У роботі було виміряні значення КСХ виготовленої антени у частотному діапазоні обраного пристрою – 3,2...5,6 ГГц, та проведено їх подальший перерахунок у коефіцієнт відбиття:

$$S_{11} = 10 \log \left(\frac{КСХ - 1}{КСХ + 1} \right)$$

На рис. 17 приведена отримана частотна залежність коефіцієнта відбиття для обраної модифікації диск-кільцевої антени.

Результати експерименту свідчать про широкосмугові властивості антени за вхідним опором, оскільки у всьому досліджуваному діапазоні рівень коефіцієнту відбиття має значення менше –10 дБ, що відповідає результатам чисельного розрахунку.

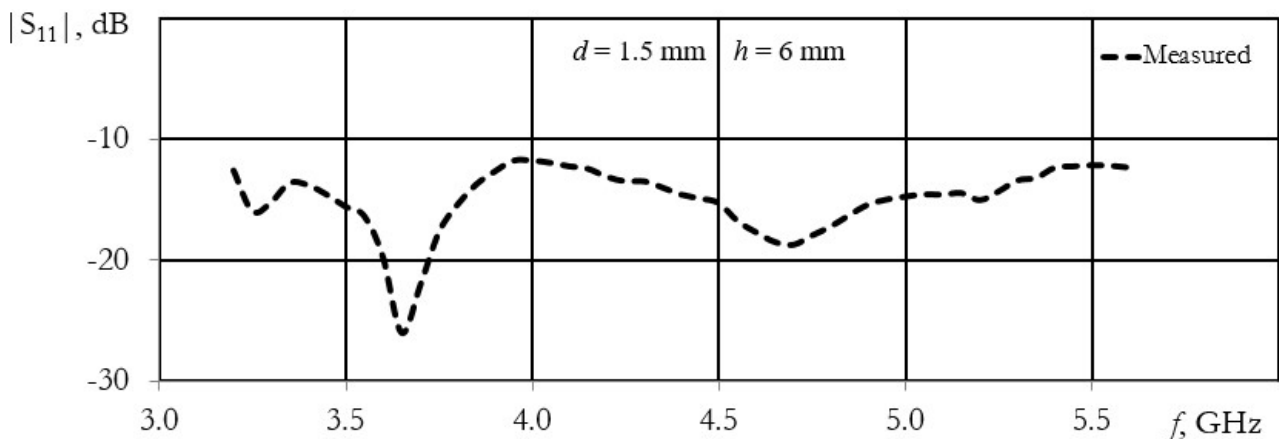


Рисунок 17 – Результати експерименту

Однією з основних особливостей і переваг запропонованої антени є можливість її оптимізації при узгодженні з лінією живлення (за рахунок зміни ширини кільця та відстані між ним і диском). При цьому, зміна геометричних розмірів майже не впливає на характеристики спрямованості антени.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, яке присвячене аналізу частотних та спрямованих характеристик поширених типів антен за межами робочого діапазону частот та розробці конструкцій широко-смугових малорозмірних антен. Найбільш вагомими науковими та практичними результатами роботи є:

1. Отримав подальший розвиток метод розрахунку позасмугових характеристик антен, що дозволяє підвищити точність оцінки електромагнітної обстановки.

2. Вперше отримані чисельні значення основних електродинамічних характеристик поширених типів антен поза смугою робочих частот, які можуть бути використанні при аналізі коефіцієнта зв'язку між антенами у задачах ЕМС РЕЗ.

3. Вперше запропонована математична модель для аналізу позасмугового рівня коефіцієнта підсилення антен, що дозволяє оцінити його значення у області бокового та заднього випромінювання.

4. Вперше представлена низка оригінальних топологій широкосмугових малорозмірних планарних антен (спірально-кільцева антена з периферійним збудженням, спірально-кільцева антена, диск-щілинна антена), відносна ширина смуги робочих частот яких знаходиться у межах від 50% до 120%, як за вхідним опором так і за характеристиками спрямованості. Головною особливістю запропонованих антен є те, що їх збудження лінією живлення відбувається у периферійній області, що не порушує планарність конструкції.

5. Проведено макетування й експериментальне дослідження характеристик запропонованих конструкцій антен для підтвердження достовірності отриманих результатів.

Список праць, опублікованих за темою дисертації

1. Цалієв Т. А. Аналіз позасмугових властивостей панельної антени / Т. А. Цалієв, Є.М. Рудий, С.В. Сідень // Цифрові технології. – 2016. – № 19. – С. 117-123

2. Цалиев Т.А. Широкополосная планарная спирально-кольцевая антенна / Т.А. Цалиев, К.В. Куцук, С.В. Сидень // Научные труды ОНАС им. А.С. Попова. – 2017. – №1. – С. 25-33

3. Цалієв Т.А. Wideband planar spiral antenna with peripheral feeding / Т.А. Цалієв, С.В. Сідень // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – №1. – С. 5-11

4. Tsaliyev T.A. Characteristics of a broadband planar disk-slot antenna: A numerical analysis / T.A. Tsaliev, S.V. Siden // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2018. – vol. 77, issue 13. – p. 1131-1139 (scopus)
5. Siden S.V. Out-of-band characteristics of the microstrip antenna / S.V. Siden // *Proceedings of the O.S. Popov ONAT*. – 2018. – № 2. – P. 13-19
6. T. Tsaliev, S. Siden and R. Fokin, "Wideband Low-Profile Disc-Ring Antenna," *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, Kiev, 2018, pp. 188-191. (scopus)
7. S. Siden, A. Vakarchuk and V. Pyliavskiy, "UWB coplanar spiral antenna," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 620-623 (scopus)
8. T. A. Tsaliev and S. V. Siden, "Planar UWB spiral antenna with peripheral feeding by coplanar waveguide," *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 2017, pp. 243-246. (scopus)
9. S. V. Siden, "Parameters of the patch antenna outside operating frequency range," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 176-179. (scopus)
10. T. A. Tsaliev and S. V. Siden, "Wideband planar spiral antenna with peripheral feeding," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2017, pp. 1-4. (scopus)
11. S. V. Siden, "Out-of-band characteristics of the panel antenna," *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, 2016, pp. 65-68. (scopus)
12. S. V. Siden, "Out-of-band gain characteristics of linear antenna array," *2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, Lviv, 2016, pp. 392-395. (scopus)
13. A. Vakarchuk, E. Sukachev, S. Siden and V. Pyliavskiy, "Analysis of cell capacity in the reverse CDMA channel," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 1078-1081
14. M. B. Protsenko, S. V. Siden, A. V. Kuznetsova and A. Sokurashvili, "Polarization sensitive multipath propagation modeling," *2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 523-525.
15. M. B. Protsenko and S. V. Siden, "Analysis of the space-polarization structure of the field near the antenna of mobile terminal," *2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, Kharkiv, 2015, pp. 1-3.

16. Сідень С.В. Оценка поляризаціонно-чувствительных многолучевых моделей распространения / С.В. Сідень, М.Б. Проценко // Мат. XIII Міжнарод. науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-13_2014), Одеса (Затока), 6-12 червня 2014. — Одеса, 2014. — С.99.

17. Сідень С.В. Низько-профільна ширококутова диск-кільцева антена / С.В. Сідень, Р.А. Фокін // Мат. XIX Міжнарод. науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-18_2018), Одеса (Затока), 8-13 червня 2018. — Одеса, 2018. — С.284.

18. Сідень, С. В. Використання адаптивних антенних решіток для зменшення завад в мережі E-UTRA». / С.В. Сідень, Д. О.Маковеєнко, Р.А. Фокін // Мат. XIX Міжнарод. науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-19_2019), Одеса (Затока), 14-17 червня 2019. — Одеса, 2019. — С.36-37.

19. Патент України на корисну модель UA 133671 U, H01Q 9/02 (2006.01). Низькопрофільна ширококутова диск-кільцева антена / Цалієв Т.А., Сідень С.В. - № u 2018 04455; заявл. 23.04.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл.№ 8

20. Широкутова планарна антена колової поляризації з периферійним збудженням спіралі: пат. 121054 Україна: МПК6 H01Q 9/02 (2006.01) H01Q 1/36 (2006.01); заявл. : 26.01.2018; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6.

Анотація

Сідень С.В. Позасмугові характеристики мікрохвильових випромінювачів та розробка конструкцій ширококутових планарних антен. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, 2020.

Дисертаційна робота присвячена аналізу та покращенню частотних та спрямованих характеристик антен у широкій смузі частот. В роботі проаналізовані основні електродинамічні характеристики поширених типів антен (лінійної еквідистантної антенної решітки, панельної антени базових станцій мобільного зв'язку та мікросмушкового випромінювача) за межею робочої смуги частот, результати якого показують необхідність врахування позасмугових характеристик антен у задачах аналізу електромагнітної сумісності. Розроблено математичну модель для оцінки позасмугового середнього рівня коефіцієнта підсилення антен у області бокового та заднього випромінювання, що може підвищити точність оцінки електромагнітної обстановки та забезпечити ЕМС РЕЗ. Розроблені принципово нові топології конструкцій малорозмірних антен, що

мають малу зміну своїх характеристик (тобто мають широкопосмугові властивості), а саме: спірально-кільцева антена, диск-щілинна антена, спірально-кільцева антена. Відносна ширина смуги робочих частот розроблених антен лежить у межах від 50% до 120% як за вхідним опором, так і за характеристиками спрямованості. Основною особливістю даних антен є те, що збудження випромінюючого елемента здійснюється у периферійній області, що не порушує планарність конструкції

Ключові слова: частотні та спрямовані характеристики антен, електромагнітна сумісність, чисельне моделювання, метод моментів, широкопосмугові антени.

Аннотація

Сидень С.В. Внеполосные характеристики микроволновых излучателей и разработка конструкций широкополосных планарных антенн. – На правах рукописи.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.12.07 – антенны и устройства микроволновой техники. - Одесская национальная академия связи им. О.С. Попова, Одесса, 2020.

Диссертационная работа посвящена анализу и улучшению частотных и направленных характеристик антенн в широкой полосе частот. В работе проанализированы основные электродинамические характеристики распространенных типов антенн (линейной эквидистантной антенной решетки, панельной антенны базовых станций мобильной связи и микрополоскового излучателя) за пределами рабочей полосы частот, результаты которого показывают необходимость учета внеполосных характеристик антенн в задачах анализа электромагнитной совместимости. Разработана математическая модель для оценки среднего внеполосного уровня коэффициента усиления антенн в области бокового и заднего излучения, которое может повысить точность оценки электромагнитной обстановки и обеспечить ЕМС РЕЗ. Разработана принципиально новая топология конструкций малоразмерных антенн, которые имеют малое изменение своих характеристик (то есть имеют широкополосные свойства), а именно: спирально-кольцевая антенна, диск-щелевая антенна, спирально-кольцевая антенна. Относительная ширина полосы рабочих частот разработанных антенн лежит в пределах от 50% до 120% за входным сопротивлением, так и по характеристикам направленности. Основной особенностью данных антенн является то, что возбуждение излучающего элемента осуществляется в периферийной области, которая не нарушает планарность конструкции.

Ключевые слова: частотные и направленные характеристики антенн, электромагнитная совместимость, численное моделирование, метод моментов, широкополосные антенны.

Summary

Siden S.V. Out-of-band characteristics of microwave radiators and development of a wideband planar antennas. – On rights for a manuscript.

A thesis submitted in fulfillment of Ph.D (candidate) degree in technical science on speciality 05.12.07 – Antennas and Microwave Devices. – O.S. Popov Odesa national academy of telecommunications, Odesa, 2020.

In the dissertation work the out-of-band characteristics of microwave devices are investigated and new types of constructions of planar antennas having broadband characteristics, both on input resistance, and on directivity characteristics are developed.

The first section provides a critical analysis of the frequency and directional characteristics of antennas. Methods of analysis of the influence of directional characteristics in the problems of electromagnetic compatibility of electronic means are considered. The main reasons for the change of frequency and directional characteristics of antennas are shown, the need to take them into account when analyzing the electromagnetic environment and the problem of reducing the coupling coefficient between antennas. A mathematical model for the analysis of the out-of-band level of the antenna gain is proposed, which differs from the existing ones in that it allows a more correct analysis of its value in a specific sector of the angles. In addition, the problem of developing new types of compact antenna designs with broadband properties, both in terms of input resistance and directional characteristics, which can be used in problems of ensuring the electromagnetic compatibility of electronic means.

The second section presents the results of the analysis of the main electrodynamic characteristics of common types of antennas in a wide frequency band that can be used in the analysis of the electromagnetic environment in electromagnetic compatibility problems. For the analysis of out-of-band frequency and directional characteristics of antennas, CAD was used for numerical electrodynamic modeling of FEKO, based on the use of the method of moments (Method of Moments) implemented in the frequency domain. A number of common wireless antennas are considered, including a linear antenna array, a panel antenna of mobile base stations, and a microstrip antenna.

The results of the study allowed to clearly demonstrate the features of frequency and directional characteristics and to establish the numerical values of the gain and the nature of its change outside the operating frequency band, which is of particular importance in solving EMC problems.

The third section is devoted to the development of new topologies of compact antenna structures with broadband properties and minimum mass and dimensional parameters. Such antennas can be used in EMC RES problems to measure the levels of electromagnetic oscillations in a wide range, or as reference antennas for compact (small) anechoic chambers. Fundamentally new topologies of small antennas (spiral-ring antenna, disk-slit antenna, spiral-ring antenna) have been developed, the relative bandwidth of which is in the range from 50% to 120%, both in terms of input

resistance and directional characteristics. The main feature of the proposed antennas is that the excitation of the power line occurs in the peripheral region, which does not violate the planarity of the structure.

In the fourth section of the dissertation an experimental study of the characteristics of the proposed antennas. To do this, the process of antenna layout and features of the experiment are described. The obtained results of field experiments are presented, and their comparison with the calculated (numerical) results is given.

Keywords: frequency and directional characteristics of antennas, electromagnetic compatibility, numerical simulation, method of moments, broadband antennas.

Перелік умовних скорочень

КП – коефіцієнт підсилення;

ДС — діаграма спрямованості;

КСД — коефіцієнт спрямованої дії;

САПР - система автоматизованого проектування і розрахунку;

ГПДС – головна пелюстка діаграми спрямованості;

ЕМС РЕЗ – електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів;

КСХ – коефіцієнт стоячих хвиль;

СЛАР – система лінійний алгебраїчних рівнянь;

ЛАР – лінійна антенна решітка;

МСА – мікросмужкова антена;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

Підписано до друку 12.11.2020 р.
Формат 60/88/16. Обсяг 0,9 друк. арк.
Тираж 100 прим. Зам. №5987.

Надруковано у ФОП Бондаренко М. О.
м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60
т. +38 0482 35 79 76
info@aprel.od.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців ДК № 4684 від 13.02.2014 р.