

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

ТЕПЛЯКОВ ІВАН ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.371+537.862

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕБРИСТО-СТЕРЖНЕВОЇ
ВИПРОМІНЮВАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМОВОГО
РОЗРЯДУ**

Спеціальність 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

**Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України**

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент
Гоблик Віктор Васильович, Національний університет
"Львівська політехніка", доцент кафедри електронних
засобів інформаційно-комп'ютерних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Козловський Валерій Валерійович, перший проректор
Національного авіаційного університету;

кандидат технічних наук, доцент
Плющ Олександр Григорович, доцент кафедри мобільних
та відеоінформаційних технологій Державного університету
телекомунікацій.

Захист дисертації відбудеться “10” липня 2020 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “09” червня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н



М. І. Бешлей

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Привабливість плазмоніки, перш за все, полягає у тому, що завдяки плазмонам можна концентрувати електромагнітну енергію в малих (відносно довжини хвилі світла) об'ємах. Окрім цього, властивостями плазмонів можна керувати в дуже широких межах. Завдяки унікальним фізичним властивостям поверхневих плазмонів в гігагерцовому та терагерцовому діапазонах частот набули широкого використання модульовані метал-діелектричні структури як компоненти інфокомунікаційної техніки, наприклад, в засобах інтерферометрії, мікроскопії, біосенсорики та спектроскопії для передавання, приймання електромагнітних сигналів та вимірювання фазової швидкості поверхневих електромагнітних хвиль (ПЕХ). Це відкриває нові можливості у конструюванні широкого класу радіотехнічних приладів та пристроїв, таких як антени, інтерферометри, коліматори, спектрометри та інші. Вони характеризуються високою надійністю та точністю роботи, низькими енергетичними та економічними затратами, малими геометричними розмірами та простотою виготовлення конструкції.

Вагомий внесок у дослідження та розвиток теорії радіотехнічних та телекомунікаційних засобів, виготовлених на основі модульованих метал-діелектричних структур, зокрема ребристо-стержневих структур (РСС), в яких інформаційні процеси поширюються за допомогою ПЕХ, плазмонів та плазми, належить вітчизняним та зарубіжним вченим: Боргу Г., Андерсону Т., Алексєєву І., Маркову Г. Т., Чапліну А. Ф., Міллеру М. А., Таланову В. І., Сазонову Д. М., Дабкіну А. Л., Гоблику В. В., Болесті І. М., Дубровці Ф. Ф., Овсянікову В. В., Пістолькорсу А. А., Отто А., Кретчману Е. та іншим.

Нині спостерігається значне підвищення інтересу до задач, пов'язаних з дослідженням розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні засобів передавання електромагнітної енергії, виготовлених на основі твердотільної або газорозрядної плазми, а також до методів їхнього аналізу, зокрема, моделювання розподілу електричного поля в дальній зоні. Ключову роль при цьому відіграють ПЕХ, які здатні поширюватися на межі плазмоподібного середовища та ребристої структури, що є перспективним механізмом передачі електромагнітної енергії. Така задача є актуальною, оскільки має важливе практичне значення для потреб військового призначення, а саме: розроблення нових та покращення ефективності існуючих засобів прихованої радіолокації; удосконалення існуючих та створення нових засобів інфокомунікацій, робота яких основана на трьохдіпазонному стандарті Wi-Gig.

Із літературних джерел відомо, що радіотехнічні та телекомунікаційні засоби передавання електромагнітної енергії, виготовлені на базі плазмового розряду, мають ряд вагомих переваг над звичайними металевими, діелектричними та метал-діелектричними засобами, а саме: можливість динамічного варіювання робочою частотою, спрямованістю, підсиленням, пропускнуою здатністю. При цьому засоби передавання інформації, виготовлені на базі плазмового розряду характеризуються тим, що у разі вимкнення плазмового генератора, плазма миттєво повертається в стан звичайного непровідного газу, стаючи непомітною для радара. Ця властивість є важливою та актуальною з точки зору розроблення нових засобів прихованої

радіолокації, стійких до радіоелектронної боротьби.

Отже, розробка нових технічних рішень для підвищення ефективності параметрів та характеристик випромінювання модульованих метал-діелектричних структур шляхом розроблення нового методу синтезу РСС на основі плазмового розряду та зміни параметрів модуляції поверхневого імпедансу (ПІ), удосконалення математичних та імітаційних моделей розрахунку розподілу електричної складової електромагнітного поля в дальній зоні є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими планами. Тема дисертації відповідає науковому напряму кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт:

- Розв'язання нових дифракційних задач для розвитку електромагнітного та акустичного неруйнівного контролю конструкційних матеріалів, номер держ. реєстрації 0115U000122;

- Моделювання процесів електромагнітного відклику в модульованих нанорозмірних метал-діелектричних та напівпровідникових структурах (ДБ/Теза), номер держреєстрації 0113U001354.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методу підвищення ефективності випромінювання РСС шляхом використання плазмового розряду та зміни параметрів модуляції ПІ.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати та узагальнити літературні дані щодо сучасного стану та перспектив розвитку радіотехнічних та телекомунікаційних засобів передавання електромагнітної енергії, принцип роботи яких оснований на використанні фізичних властивостей поверхневих плазмонів та плазми.

2. Запропонувати та обґрунтувати шляхи покращення параметрів випромінювання для засобів передавання електромагнітної енергії, виготовлених на основі РСС в присутності плазмового розряду та розвинути методи визначення цих параметрів.

3. Розробити нові моделі, числовий алгоритм та прикладний комп'ютерний комплекс для дослідження електродинамічних параметрів широкого класу компонентів та засобів передавання електромагнітної енергії, виготовлених на основі РСС з використанням плазмового розряду.

4. На основі запропонованих моделей РСС дослідити вплив параметрів ПІ, а також присутності та відсутності газорозрядної плазми в структурі на форму розподілу електричної складової електромагнітного поля в дальній зоні.

5. Створити фізичний зразок РСС з використанням плазмового розряду, провести експериментальну верифікацію запропонованих моделей та надати оцінку отриманого підвищення ефективності випромінюючих властивостей РСС.

6. Запропонувати конкретні практичні рекомендації щодо використання РСС, виконаних на основі плазмового розряду, як компонентів антенної техніки при потребі забезпечення дископодібного розподілу електромагнітного поля, що сприятиме підвищенню коефіцієнта спрямованої дії (КСД).

Об'єкт досліджень: процеси випромінювання електромагнітної хвилі випромінювальними компонентами на основі РСС.

Предмет досліджень: моделі та методи підвищення ефективності випромінювальних компонентів на основі РСС для пристроїв радіотехнічних та телекомунікаційних систем.

Методи дослідження: для реалізації поставлених завдань використано методи математичного аналізу, методи математичної фізики, засоби комп'ютерної алгебри (пакети програм Python та MATLAB). Для знаходження вхідних опорів диполів із заданим розподілом напруг на вході застосовано метод наведених електро-рушійних сил (ЕРС). Імітаційне моделювання електродинамічних параметрів РСС з використанням плазмового розряду виконано на основі методу скінченних елементів та моделі Друде. Експериментальну перевірку результатів моделювання з метою верифікації удосконаленої математичної та розробленої імітаційної моделей виконано методом вимірювання напруженості електричного поля випромінювання РСС в дальній зоні.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано *метод розрахунку* РСС, який, на відміну від відомих, на основі використання методу А.Ф. Чапліна, призначеного для задач збудження модульованих імпедансних структур, модуляції ПІ металевими радіальними неоднорідностями та завдяки заміні металевого стержня плазмовим розрядом, дає змогу підвищити ефективність спрямованого випромінювання в площині вектора напруженості електричного поля.

2. Вперше запропоновано *імітаційну модель* РСС, яка, на відміну від відомих, використовує газорозрядну плазму з методикою розрахунку її параметрів за теорією Друде, що дало змогу дослідити випромінювальні властивості РСС в умовах наявності та відсутності плазми.

3. Удосконалено *математичну модель* для РСС зі скінченними, на відміну від відомих, розмірами, що дало змогу оцінити характеристики випромінювання та дослідити вплив на них ширини та періоду металевих радіальних неоднорідностей, а також відбитої від кінця структури ПЕХ у заданій смузі частот.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Удосконалено конструкцію РСС з коефіцієнтом поширення рівним 1.09 шляхом використання плазмового розряду, що дало змогу отримати поперечне випромінювання в площині вектора напруженості електричного поля та підвищити КСД на 3,59 дБ, як основного параметра ефективності РСС.

2. На основі методу наведених ЕРС удосконалено алгоритм розрахунку нормованої за амплітудою діаграми спрямованості (ДС) в дальній зоні для РСС, який, на відміну від існуючих, дає змогу врахувати вплив коефіцієнтів поширення, відбиття та загасання біжучої хвилі на особливості формування розподілу напруженості електричного поля.

3. На основі розробленої імітаційної моделі РСС методом скінченних елементів встановлено, що використання 9 ітерації є достатнім для розрахунку електродинамічних параметрів в технології HFSS та отримано смугу робочих частот 12% за рівнем коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) < 2 в частотному діапазоні 2..3 ГГц.

4. На базі відкритої інтерпретованої мови програмування Python розроблено програмний комплекс для автоматизованого отримання розподілу напруженості електричного поля РСС у вигляді нормованої за амплітудою ДС в дальній зоні.

5. Розроблено експериментальний зразок РСС з використанням плазмового розряду довжиною $4\lambda_0$, на основі якого підтверджено, що отримане значення амплітуди вектора напруженості електричного поля на 50% більше в напрямку, поперечному відносно головної осі досліджуваної структури, у порівнянні з результатом, отриманим в умовах відсутності плазми в цій структурі.

Практичну цінність отриманих результатів підтверджує акт впровадження, отриманий у Фізико-механічному інституті ім. Карпенка НАН України (м. Львів).

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному виконанні теоретичної та експериментальної частин роботи та інтерпретації одержаних результатів. У публікаціях, написаних автором дисертації у співавторстві: у роботах [1-3] запропоновано та обґрунтовано доцільність використання РСС, розроблених на основі плазмового розряду, з метою виготовлення нового класу випромінювальних надвисокочастотних (НВЧ) приладів та пристроїв; запропоновано алгоритм, за допомогою якого розв'язано задачу синтезу РСС на основі методу наведених ЕРС [5]; у роботах [7-9] виконано огляд сучасного стану та перспектив розвитку метал-діелектричних структур; запропоновано та обґрунтовано доцільність використання РСС з використанням плазмового розряду [10]; проаналізовано можливість їхнього використання в засобах інфокомунікацій [11]; досліджено можливість побудови інтерферометра на основі метал-діелектричної структури та виконано дослідження параметрів ПІ на роздільну здатність інтерферометра [12].

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях:

- 13th International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Lviv-Slavske, Ukraine, 2016);
- 11th International Conference «International Conference on Antenna Theory and Techniques» (Kyiv, Ukraine, 2017);
- Міжнародна науково-технічна конференція «GEOFORUM`2018» (Львів-Яворів-Брюховичі, Україна, 2018);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ» (Львів, Україна, 2018).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих наукових праць, з них: 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 1 стаття у науковому фаховому виданні України, яке індексується міжнародною наукометричною базою Scopus та 4 статті, що індексуються у НМБ Index Copernicus International, з них дві написані одноосібно, праць у збірниках матеріалів і тез доповідей конференцій – 6 (з них 2 індексуються науко-метричною базою Scopus).

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг роботи 182 сторінки, з них 113 сторінки – основного тексту. Дисертація містить 61 рисунок і 10 таблиць. Список використаних джерел нараховує 117 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні завдання дисертаційних досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, відображено наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих

результатів. Наведено дані стосовно особистого внеску дисертанта в наукових працях, опублікованих у співавторстві, апробації результатів роботи на науково-технічних конференціях.

У першому розділі – «Сучасний стан розвитку засобів інфокомунікаційних систем, виготовлених на основі метал-діелектричних структур та плазмового розряду» проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку засобів передавання електромагнітної енергії, принцип роботи яких оснований на використанні фізичних властивостей поверхневих плазмонів, ПЕХ та плазми:

1) розглянуто наукові праці та результати, присвячені дослідженню метал-діелектричних структур, зокрема, РСС, як компонентів широкого класу засобів інфокомунікаційних систем, а також місце даної роботи в загальному доробку праць українських та зарубіжних науковців за тематикою кандидатської дисертаційної роботи;

2) проаналізовано основні сучасні методи збудження ПЕХ в засобах інфокомунікацій, виготовлених на основі метал-діелектричних структур або комбінації плазми та діелектрика, зазначено їхні переваги та недоліки, оцінено шляхи підвищення ефективності випромінювання РСС.

Літературний огляд дав можливість встановити, що вагому роль у розвитку сучасних засобів передавання електромагнітної енергії відіграє використання газорозрядної та твердотільної плазми як ключового компонента для поширення ПЕХ. Тому особлива увага присвячена дослідженню параметрів газорозрядної та твердотільної плазми, а саме: провідності плазми, плазмовій частоті та діелектричній проникності плазми. Проведене дослідження показало, що доцільно використати модель Друде для імітаційного моделювання електродинамічних параметрів засобів інфокомунікаційних систем, в яких основним структурним компонентом є плазмовий розряд.

Виявлено, що в літературі добре відомі результати теоретичних досліджень електродинамічних параметрів РСС, як компонентів антенних систем, виготовлених на основі метала, діелектрика або комбінації метала та діелектрика. Основна особливість цих досліджень полягає у тому, що такі РСС аналітично можна представити у вигляді нескінченно довгих структур, Π яких змінюється за періодичним законом. Недоліком таких математичних моделей є той факт, що у випадку співрозмірності робочої довжини хвилі та довжини РСС, точність розрахунку зменшується. Це зумовлює потребу в розробленні нових моделей РСС, співрозмірних з довжиною хвилі у вільному просторі. З іншого боку добре відомі результати досліджень структур, виготовлених з використанням плазмового розряду та постійним Π вздовж усієї довжини структури, проте відсутні результати досліджень випромінювальних засобів на основі газорозрядної плазми зі змінним Π . Встановлено, що засоби, виготовлені на основі плазмового розряду, характеризуються кращими випромінювальними характеристиками та параметрами. Це зумовлює пошук методу підвищення ефективності РСС шляхом використання комбінації плазмового розряду та модуляції Π . В результаті було виявлено можливість використати газорозрядну плазму компонентом конструкції РСС, що має змінний Π , а також підтримує збудження та поширення ПЕХ.

У другому розділі – «Моделі та метод аналізу ребристо-стержневої структури» запропоновано та обґрунтовано два методи розв'язку завдань, поставлених у дисертаційній роботі: 1) розрахунок РСС на основі методу, розробленого А. Ф. Чапліним, для задач збудження нескінченних модульованих імпедансних структур; 2) використання наближеного чисельного методу наведених ЕРС для розв'язку задачі аналізу РСС скінченних розмірів.

Перший запропонований метод розрахунку РСС у строгій формі зводиться до рішення граничної задачі, під час розв'язку котрої можна застосувати широкий набір відомих математичних методів, розроблених в електродинаміці, теорії дифракції та математичній фізиці. Для випадку збудження нескінченно довгої РСС стороннім джерелом поля, А. Ф. Чапліним було виведено неоднорідне інтегральне рівняння Фредгольма другого роду (1) для довільного закону зміни ПІ $Z_E(y)$ вздовж осі y , яке є початковим пунктом для розв'язування завдань, поставлених у цій дисертаційній роботі.

$$\varphi(\chi) = \psi(\chi) - i\omega \varepsilon_a' \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{Z}_E(\chi - \eta)}{\sqrt{\eta^2 - k^2}} \varphi(\eta) d\eta. \quad (1)$$

Для аналізу РСС на основі методу А. Ф. Чапліна справедливі імпедансні граничні умови (2).

$$Z_E(y) = Z_0 + Z_{M1} \sum \text{rect}\left(\frac{y - nd_1}{\Delta}\right), \quad (2)$$

де: Δ – ширина імпульсної функції; d_1 – період послідовності імпульсної функції ($d_1 = 2\lambda_0, 3\lambda_0, 5\lambda_0, 10\lambda_0$); n – нескінченна послідовність цілих чисел; Z_{M1} – амплітуда прямокутної імпульсної функції; Z_0 – постійна складова ПІ; rect – математичний оператор, який задає форму прямокутних імпульсів. Закон розподілу ПІ РСС в графічному вигляді наведено на рис. 1.

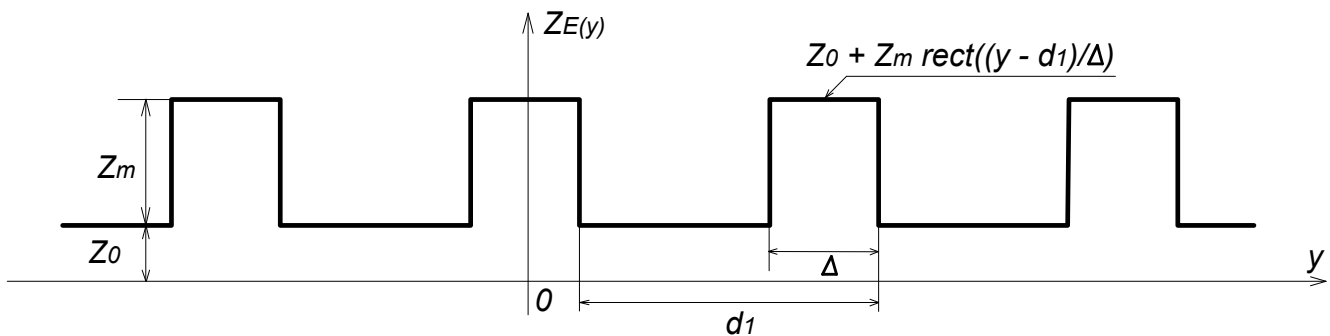


Рис. 1. Закон розподілу поверхневого імпедансу

Стосовно досліджуваної РСС суть методу А. Ф. Чапліна полягає у наступному: розв'язування задачі збудження РСС зводиться до знаходження розв'язку неоднорідного інтегрального рівняння (1) відносно спектральної густини невідомої функції розподілу струмів поляризації $\varphi(\chi)$, що протікають у структурі, та граничних умов (2). В результаті досліджень запропоновано аналітичну функціональну залежність (3), що описує нормовану величину напруженості електричного поля E в залежності від кута спостереження θ° в дальній зоні для заданих параметрів

конструкції стержневої за геометричною формою модульованої метал-діелектричної структури.

$$E(\theta^\circ) = \frac{\cos(\theta^\circ)}{\left[\cos(\theta^\circ) - \hat{Z}_0 \right]^* \left(1 - \hat{Z}_1 \frac{\Delta}{2d_1} \sum_{n=-N}^N \frac{\operatorname{sinc}\left(\frac{n\pi\Delta}{2d_1}\right)}{\sqrt{\left(\sin(\theta^\circ) - \frac{n\lambda}{d_1}\right)^2 - 1 - \hat{Z}_0}} \right)}. \quad (3)$$

Слід зазначити, що запропонована математична модель (3) відноситься до особливого класу гіллястих ланцюгових дробів. Такі дроби використовують при математичному моделюванні дифракції хвиль на імпедансних та періодичних діелектричних поверхнях. У випадку збільшення кількості функцій, якими модулюється ПІ стержня, збільшується кількість складових у знаменнику дроби (3). Ця математична модель задовольняє розв'язок неоднорідного інтегрального рівняння (1) відносно спектральної густини невідомої функції розподілу струмів поляризації $\varphi(\chi)$ та граничних умов (2).

Розраховано серію розподілів електричної складової електромагнітного поля в дальній зоні з використанням математичної моделі (3) у вигляді нормованих за амплітудою ДС для різних значень параметрів ПІ РСС (рис. 2).

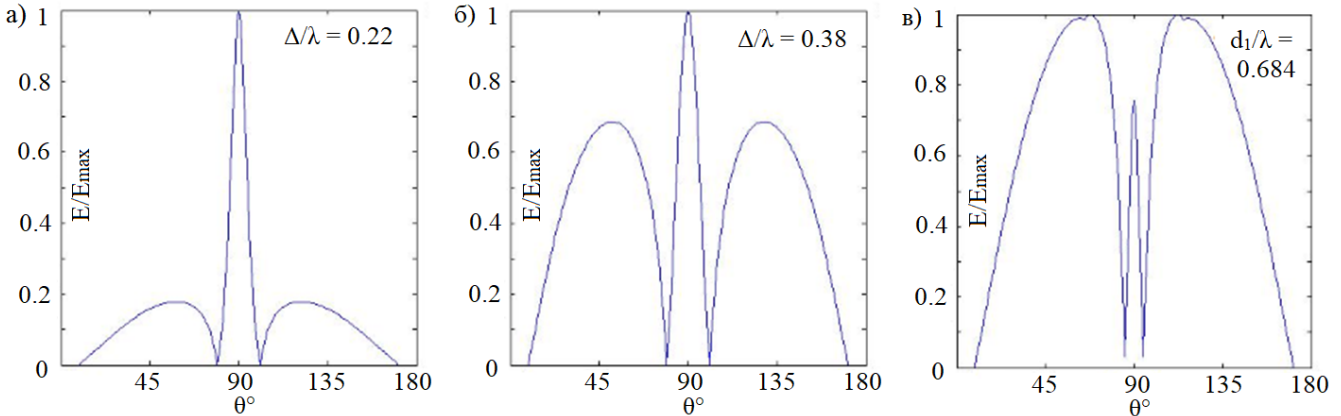


Рис. 2. Діаграми спрямованості:

а – $d_1/\lambda_0 = 0,712$; б – $d_1/\lambda_0 = 0,712$; в – $\Delta/\lambda_0 = 0,207$

Аналіз рис. 2 свідчить про те, що відносні значення ширини та періоду прямокутних імпульсів функції *rect* впливають на форму ДС РСС, що для досліджуваних значень проявляється в зростанні рівня бокових пелюсток. ДС на рис. 2а представляє науково-практичний інтерес, оскільки вона характеризує вузькоспрямоване випромінювання, зокрема максимум КСД напрямлений у поперечному напрямку відносно осі РСС. Використання математичної моделі (3) дало можливість дослідити вплив амплітуди, ширини та періоду імпульсної функції на форму розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні.

При розробці моделі РСС скінченних розмірів, зокрема, співрозмірних з робочою довжиною хвилі у вільному просторі, необхідно врахувати вплив відбитої від кінця структури ПЕХ та забезпечити її синфазне перевипромінювання з падаючою ПЕХ. Також необхідно забезпечити випромінювання рівної кількості

енергії елементами, які внесені в РСС, для збільшення ККД системи. Для цього використано наближений чисельний метод наведених ЕРС, за допомогою якого розроблено модель РСС скінчених розмірів, що враховує ці фактори.

Для чисельного розрахунку обрано РСС загальною довжиною $L = 4\lambda_0$, яка містить 4 металеві радіальні неоднорідності довжиною l_i , які математично мають зміст прямокутних імпульсів в моделі (3). На рис. 3 в прямокутній системі координат XYZ наведено структуру та модель досліджуваної РСС, яка складається зі стержня 1, чотирнадцяти плоских металевих кілець 2, використаних як штучний діелектрик для сповільнення біжучої ПЕХ, та чотирьох металевих радіальних неоднорідностей 3. Для аналізу РСС на основі методу наведених ЕРС металеві радіальні неоднорідності та металеві кільця інтерпретовано системами, що складаються з N_i кількості ізотропних диполів довжиною l_i та радіусом $a \ll l_i$.

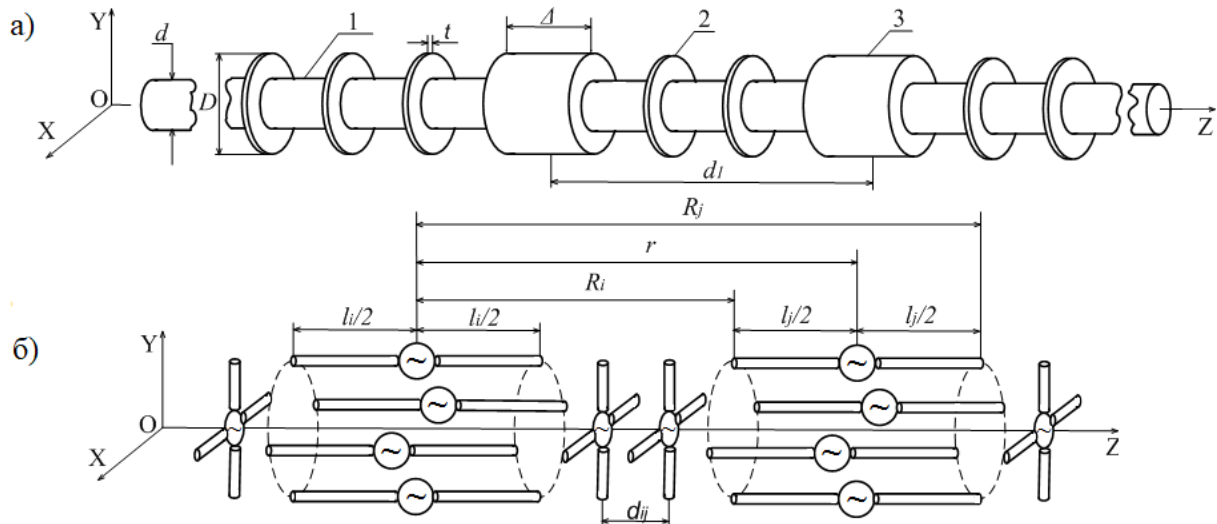


Рис. 3. Структура (а) та модель (б) ребристо-стержневої структури

При розв'язанні задачі аналізу РСС для кожного диполя необхідно скласти своє інтегральне рівняння відносно граничних умов, при цьому загальна кількість рівнянь в системі рівна кількості диполів. В результаті застосування методу наведених ЕРС до системи інтегральних рівнянь отримано систему алгебраїчних рівнянь у вигляді $(Z) \times (I) = (U)$, де (Z) – матриця власних та взаємних імпедансів, (I) – вектор-стовпець невідомих амплітуд поверхневих струмів, (U) – вектор-стовпець напруг. Для визначення напруги живлення диполів в моделі РСС (рис. 3б) вдосконалено математичну модель падаючої та відбитої хвилі в довгій лінії передачі:

$$U(z) = U_0 \left(e^{-\gamma z} + \rho e^{-\gamma |z-L|} \right), \quad (4)$$

де: $\gamma = \alpha + j\beta$ – комплексна стала поширення; α – коефіцієнт затухання; β – коефіцієнт фази; ρ – коефіцієнт відбиття; L – довжина структури, z – координата поширення падаючої ПЕХ.

З використанням (4) отримано розподіли напруги $U(z)$ вздовж РСС з урахуванням залежності коефіцієнта поширення P від параметрів конструкції, а саме для структури зі співвідношенням $(D - d)/\lambda_0 = 0,22$. Між відносним коефіцієнтом поширення P та коефіцієнтом затухання α існує зв'язок $P = \sqrt{1 + \alpha^2}$, що дає можливість розрахувати значення коефіцієнта затухання для досліджуваної РСС. Таке математичне представлення розподілів напруги $U(z)$ вздовж структури

уможливило врахування згущення ПЕХ, а також відбиту від кінця структури біжучу хвилю, що забезпечує додаткове випромінювання електромагнітної енергії металевими радіальними неоднорідностями з урахуванням різниці фаз (рис. 4).

Згідно теореми про перемноження ДС, розподіл напруженості електричного поля $E(\theta^\circ)$ в дальній зоні для моделі РСС, наведеної на рис. 3б, можна знайти у вигляді добутку векторної комплексної ДС одного елемента $f_{el}(\theta^\circ)$ на скалярний множник спрямованості $f_{\Sigma}(\theta^\circ, \varphi^\circ)$, для знаходження якого застосовано пряме перетворення Фур'є від визначеного раніше амплітудно-фазового розподілу поверхневих струмів:

$$f_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N A_n e^{j(\Phi_n + kR_n \cos(\alpha_n))} \quad (5)$$

Проведено розрахунок значень власних та взаємних імпедансів, що дало змогу отримати в полярній системі координат серію нормованих по амплітуді ДС в Е-площині.

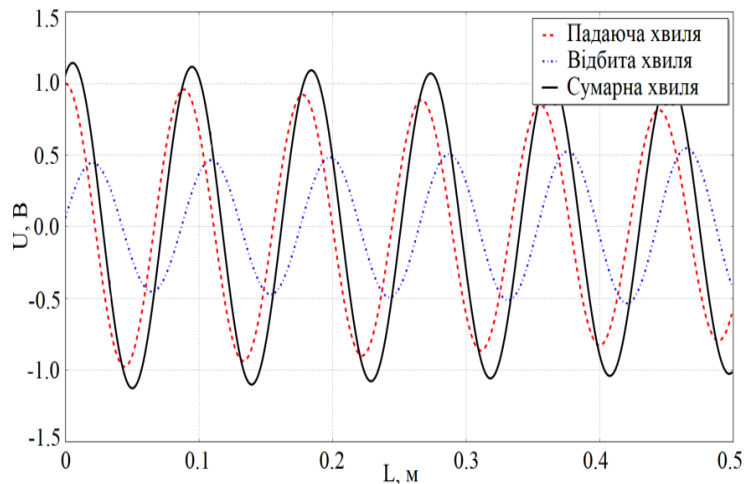


Рис. 4. Розподіл $U(z)$ вздовж ребристо-стержневої структури

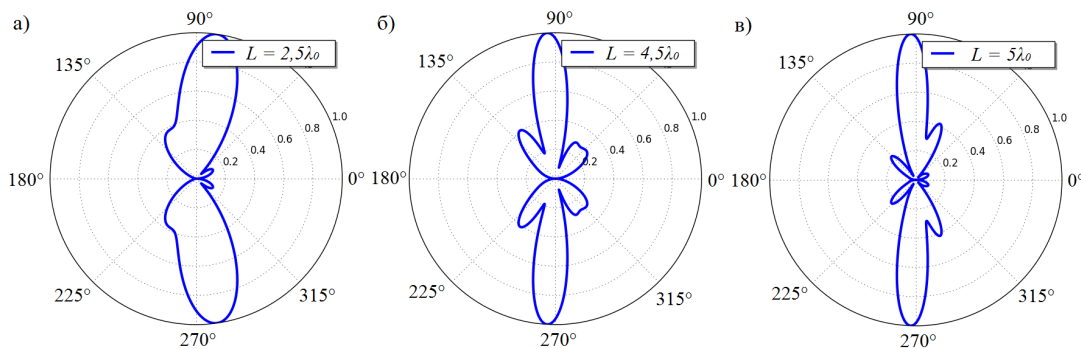


Рис. 5. Сканування амплітудної характеристики електричної складової електромагнітного поля

На рис. 5 показано ефект сканування амплітудної характеристики електричної складової електромагнітного поля за рахунок зміни відносної довжини РСС при розрахованих параметрах живлення $\alpha = 0,42$ та $\rho = 0,20$. Як видно з отриманих результатів, форма розподілу вектора напруженості електричного поля в дальній зоні близька до дископодібної. Отримані в результаті оптимізації за формою ДС відносні довжини металевих радіальних неоднорідностей Δ_i наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Відносні довжини металевих радіальних неоднорідностей

№	1	2	3	4
Δ_i/λ_0	0,216	0,300	0,372	0,250

Такі відносні довжини забезпечують однакову величину електромагнітної енергії, що випромінюється кожною металевою радіальною неоднорідністю з урахуванням прямої та зворотної, відбитої від кінця структури, ПЕХ.

У третьому розділі – «Проектування та моделювання ребристо-стержневої структури з використанням плазмового розряду в середовищі HFSS» розроблено імітаційну модель РСС на основі конструктивних параметрів, запропонованих у попередньому розділі, та на її основі проведено ряд електродинамічних досліджень методом скінченних елементів у середовищі Ansoft HFSS. Потреба розробки цієї моделі зумовлена тим, що вона дає змогу дослідити особливості випромінювання РСС з врахуванням присутності в її конструкції плазмового розряду. Значну увагу зосереджено на розробці нового матеріалу з параметрами газорозрядної плазми. Використання цього матеріалу дало можливість дослідити ефекти, пов'язані з особливостями випромінювання РСС при наявності та відсутності плазмового розряду в її конструкції.

В імітаційній моделі РСС плазму задано як середовище, що описується за теорією Друде, згідно котрої діелектричну проникність плазми ($\epsilon(\omega)$), плазмову частоту (ω_p) та провідність плазми (σ) визначено за наступними математичними співвідношеннями:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_e)}, \quad (6) \quad \omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}, \quad (7) \quad \sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_e}, \quad (8)$$

де: ω – циклічна частота радіосигналу; n_e – концентрація електронів; ν_e – частота зіткнень електронів в плазмі; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; e – заряд електрона; m_e – маса електрона.

Для розрахунку електродинамічних параметрів РСС, відносна довжина котрої становить $4\lambda_0$, встановлено максимальну кількість ітерацій рівну 10, при цьому в налаштуваннях параметрів рішення задачі величину *Maximum Delta S* задано рівною 0,02, що є стандартним значенням для отримання високої точності результатів моделювання під час розрахунку НВЧ структур в технології HFSS. Розрахунок проведено за наступним алгоритмом: 1) на заданій частоті генерується сітка, що складається з певної кількості тетраедрів, розрахованих при кожній наступній ітерації; 2) у вузлах сітки (вершини тетраедрів) обчислюється електромагнітне поле, яке задовольняє граничним умовам рівнянь Максвелла; 3) розраховується параметр *Maximum Delta S*, який визначає ступінь відмінності матриць розсіювання, розрахованих для двох сусідніх ітерацій. У випадку, якщо значення даного параметра стає меншим від заданого під час налаштувань, розрахунок припиняється.

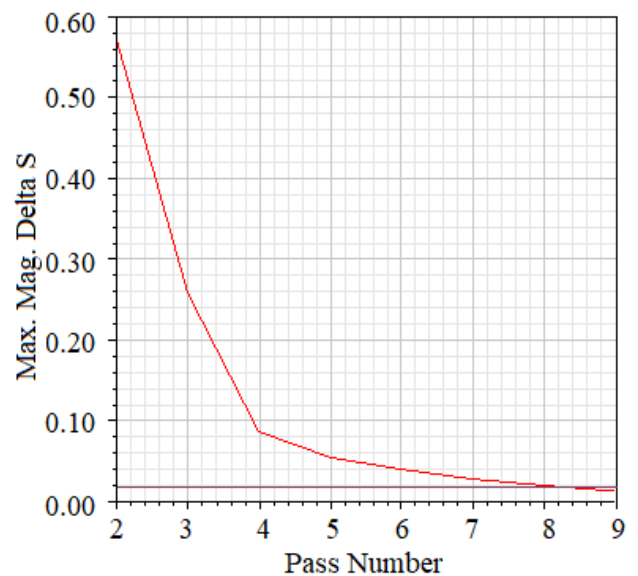


Рис. 6. Графік залежності параметра *Maximum Delta S* при 9 ітераціях рішення задачі

Інакше, розрахунок буде продовжено до заданої кількості ітерацій. На рис. 6 наведено інформацію про хід розв'язку задачі, а саме: дані про збіжність при кожній ітерації.

Як видно з результату розв'язку задачі (рис. 6), кількість ітерацій, при якій досягнуто задану точність рішення, рівна 9. Подальший розрахунок електродинамічних параметрів РСС на основі методу скінченних елементів в технології HFSS припинено. Це дозволяє зробити висновок про те, що вказаної кількості ітерацій вистачає для досягнення необхідної величини ступеня відмінності матриць розсіювання, які були розраховані для двох сусідніх ітерацій. Варто відзначити той факт, що на останній ітерації кількість тетраєдрів в моделі становила 126104.

Проведене дослідження дало змогу отримати такі результати рішення задачі:

- розраховано частотні залежності зворотних втрат (параметр S_{11}) та КСХ в частотному діапазоні 2..3 ГГц на основі котрих виявлено смугу робочих частот та резонансні частоти в цьому частотному діапазоні;

- досліджено ефекти, пов'язані з впливом присутності та відсутності в імітаційній моделі РСС матеріалу з параметрами газорозрядної плазми на особливості її випромінювання в смузі робочих частот;

- досліджено процес сканування просторового розподілу електромагнітного поля в дальній зоні при варіюванні конструктивних параметрів РСС.

Як видно на рис. 7, розроблена імітаційна модель РСС має три резонансні частоти в частотному діапазоні 2..3 ГГц. Сказане зумовлено числовими значеннями зворотних втрат в цьому частотному діапазоні. З отриманих результатів зроблено висновок, що смуга робочих частот становить 12% по рівню параметра $S_{11} < -10\text{dB}$. В табл. 2 наведено числові значення зворотних втрат і КСХ на резонансних частотах.

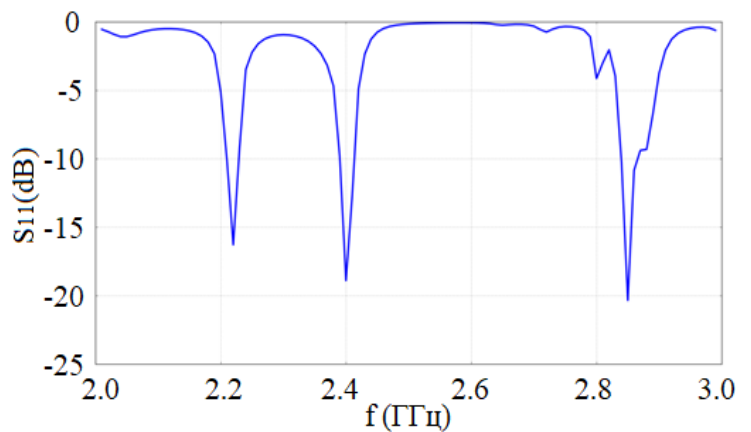


Рис. 7. Частотна залежність параметра S_{11}

Таблиця 2

Резонансні частоти

№ п/п	Резонансна частота (ГГц)	Зворотні втрати (dB)	КСХ
1	2,23	-16,5	1,93
2	2,40	-19,0	1,59
3	2,87	-20,5	1,17

На рис. 8 наведено результати чисельного моделювання просторового розподілу поля в дальній зоні у вигляді серії ДС, отриманих з використанням імітаційної моделі РСС у тривимірній декартовій системі координат при зміні значень відношення довжини до періоду металевих радіальних неоднорідностей.

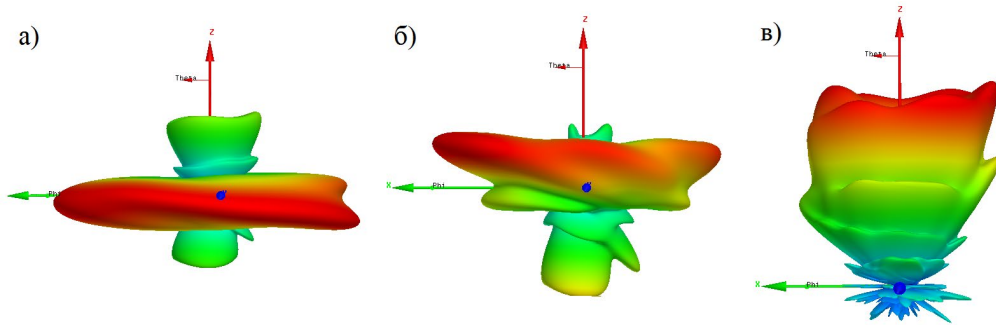


Рис. 8. Процес переходу від дископодібної форми просторового розподілу поля до конусоподібного: а – $d_1/\lambda_0 = 0,67$; б – $d_1/\lambda_0 = 0,73$; в – $d_1/\lambda_0 = 0,77$

З отриманих результатів видно, що зміна величини d_1/λ_0 призводить до зміни форми розподілу електромагнітного поля в дальній зоні, у такий спосіб можна отримати як розподіл поля у вигляді диску, так і конусоподібний розподіл поля, зокрема в роботі наведено результат моделювання багатопрменевої ДС.

У зв'язку з інтересом використання плазми в антенних системах досліджено ефект впливу присутності плазми в імітаційній моделі РСС на форму розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні. Актуальність цього дослідження зумовлена тим, що в останні роки спостерігається тенденція розвитку засобів радіоелектронної боротьби, основаної на використанні плазмових антен. При цьому досліджувалися умови випромінювання при відсутності середовища з параметрами газорозрядної плазми в імітаційній моделі, а також коли металеві деталі (кільця та радіальні неоднорідності) були виключені з конструкції РСС разом з плазмою, оскільки вони вносять додатковий вплив на величину та форму випромінювання. Результати чисельного моделювання, отримано на основі методу скінченних елементів в технології HFSS. На рис. 9 наведено серію амплітудних ДС для значень кута $\theta = 0..180^\circ$ в площині поляризації вектора напруженості електричного поля YOZ.

Аналізуючи випадок, коли присутній матеріал з параметрами газорозрядної плазми в імітаційній моделі РСС (суцільна лінія на рис. 9), максимум випромінювання спостерігається при куті спостереження 89° відносно головної осі структури. При цьому значення величини напруженості електричного поля сягає $2,7 \text{ В/м}$ при $\theta = 89^\circ$, а напруженість електричного поля бокового випромінювання перевищує значення $1,5 \text{ В/м}$ при $\theta = 20^\circ$. Проте у випадку відсутності матеріалу з параметрами

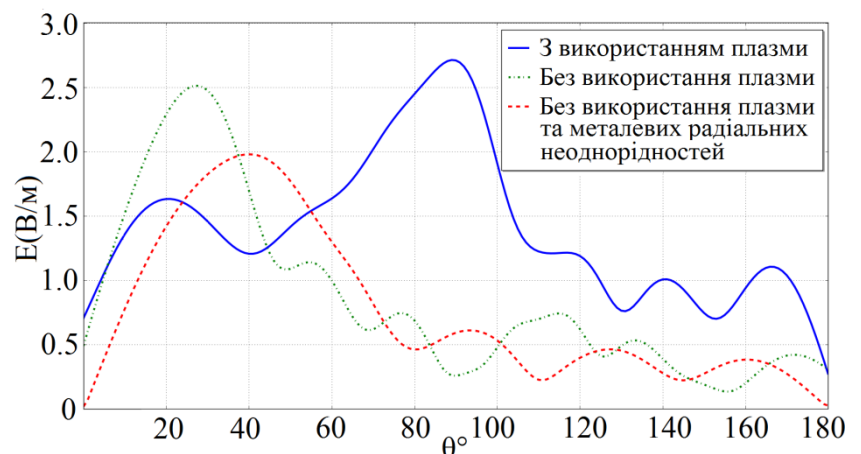


Рис. 9. Залежність величини напруженості електричного поля від кута спостереження при відсутності та наявності плазми в моделі ребристо-стержневої структури

газорозрядної плазми в конструкції РСС (штрих-пунктирна лінія на рис. 9), максимум випромінювання напрямлений під кутом 27° відносно головної осі структури, при цьому напруженість електричного поля рівна 2.5 В/м . Спостерігається значно менший рівень випромінювання при кутах спостереження $\theta = 47..177^\circ$. Варто зазначити, що значення величини напруженості електричного поля в дальній зоні приблизно рівне $0,25 \text{ В/м}$ при $\theta = 90^\circ$ у випадку відсутності матеріалу з параметрами газорозрядної плазми в конструкції РСС, що свідчить про зникнення поперечного випромінювання відносно головної осі структури.

Підсумовуючи отримані результати робимо висновок що, при відсутності в моделі деталей, виготовлених з металу, а саме: кілець та радіальних неоднорідностей, в дальній зоні РСС, відносна довжина котрої становить $4\lambda_0$, рівень напруженості електричного поля зменшується в $1,25$ раз. Зменшити рівень бокового випромінювання можна за рахунок використання діелектричної трубки з плазмою, конструктивні параметри та форма якої повністю відповідають РСС, розробленій в нашій роботі. Це дозволить позбутися використання металевих кілець та металевих радіальних неоднорідностей в конструкції РСС для досягнення поперечного випромінювання відносно головної осі структури.

У четвертому розділі – **«Практична реалізація та оцінка ефективності випромінювання ребристо-стержневої структури з використанням плазмового розряду»** поставлено задачу перевірки адекватності результатів, отриманих у попередніх розділах під час моделювання шляхом проведення фізичного експерименту. Наведено та проаналізовано основні результати досліджень РСС, виготовленої на основі металевого стержня, а також РСС з використанням плазмового розряду, отриманих під час виконання ряду експериментів. На основі розрахунку КСД оцінено підвищення ефективності випромінювання РСС. Надано практичні рекомендації щодо застосування конструктивних параметрів РСС з використанням плазмового розряду при розробці радіотехнічних та телекомунікаційних засобів, таких як антени та інтерферометри.

Для верифікації розроблених моделей та оцінки підвищення ефективності випромінювання РСС автором було розроблено експериментальний зразок РСС з використанням плазмового розряду (рис. 10) довжиною $4\lambda_0$, конструктивні параметри котрої вивчалися у попередніх розділах. Для забезпечення наявності плазмового розряду в конструкції РСС, автором використано газорозрядну лампу замість металевого стержня. Живлення РСС здійснювалося за

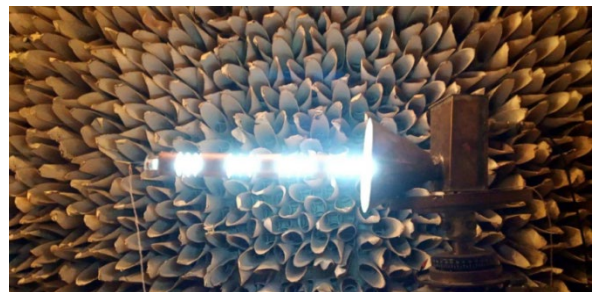


Рис. 10. Експериментальний зразок ребристо-стержневої структури

допомогою конічного рупора, на вхід якого від прямокутного хвилеводу поступала електромагнітна хвиля типу H_{10} . Експеримент проведено в науково-дослідній лабораторії НДЛ-16 Національного університету «Львівська політехніка». Для виконання експерименту використано вимірювальний стенд, застосування якого дало можливість записувати розподіл напруженості електричного поля, оцінити рівень бокових пелюсток, ширину і форму головної пелюстки, фіксувати «нулі» ДС

РСС. Для зменшення впливу зовнішніх перешкод і відбитих хвиль вимірювання виконувались в екранованій камері, яка зсередини покрита радіопоглинаючим матеріалом. Від генератора гармонічних коливань діапазону НВЧ через коаксіальний кабель на вхід еталонної рупорної антени П6-23А подавався сигнал з відомою довжиною хвилі, при цьому РСС виконувала роль приймальної антени.

На рис. 11 показано нормовані за амплітудою ДС в площині вектора напруженості електричного поля для значень $\theta = 0..180^\circ$, які було отримано в результаті моделювання на основі аналітичної моделі (3), методу наведених ЕРС, методу скінченних елементів та експериментального дослідження. Для проведення верифікації обрано робочу частоту електромагнітного сигналу, при котрій величина $d_1/\lambda_0 = 0,672$. Використовуючи метод порівняльного аналізу та розрахунок середнього квадратичного відхилення, обговорено адекватність моделей експериментальній ситуації.

В результаті експериментального дослідження отримано ДС, яка подібна до розрахункових: спостерігається спрямоване випромінювання в напрямку, поперечному до головної осі РСС, та присутність бокового випромінювання. Ширина головної пелюстки ДС, отриманої експериментально, становить 28° за рівнем 0,5, а рівень її бокових пелюсток сягає 0,15.

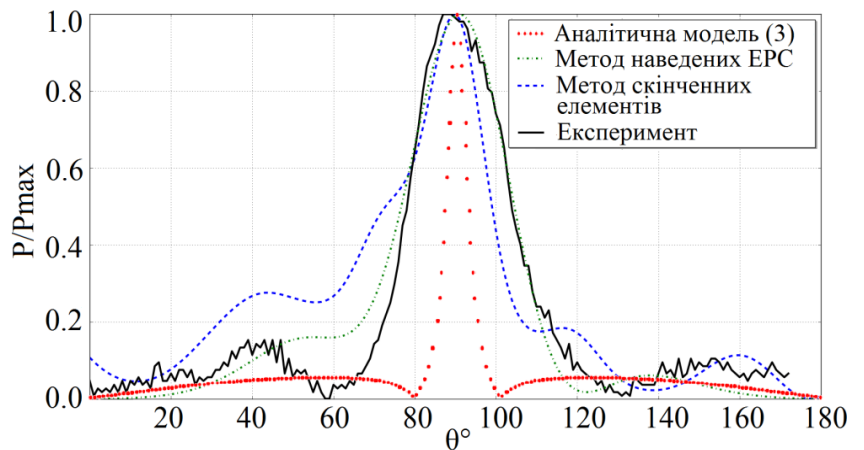


Рис. 11. Діаграми спрямованості ребристо-стержневої структури, отримані експериментально та з використанням моделей

Проаналізовано збіжність розрахунку ДС, показаних на рис. 13, з експериментально отриманим результатом за допомогою обчислення середнього квадратичного відхилення (табл. 3).

Таблиця 3

Середнє квадратичне відхилення розрахованих діаграм спрямованості

Метод розрахунку	Середнє квадратичне відхилення	Час розрахунку, с
Аналітична модель (3)	0.252027	1,82
Метод наведених ЕРС	0.072531	242,23
Метод скінченних елементів	0.189508	1320,14

Порівняльний аналіз отриманих ДС і результати обчислення середнього квадратичного відхилення свідчать про те, що розрахунок РСС довжиною $4\lambda_0$ за допомогою використання методу наведених ЕРС забезпечує найбільшу точність обрахунку ДС. Про те основним недоліком використання методу наведених ЕРС для розв'язку задачі аналізу РСС, співрозмірної з довжиною хвилі у вільному просторі, є значні затрати часу, оскільки при збільшенні числа диполів, інтерпретуючих металеві радіальні неоднорідності та кільця, збільшуються обчислювальні ресурси.

Зазначимо, що використання методу скінченних елементів забезпечує кращу збіжність розрахунку ДС РСС довжиною $4\lambda_0$ у порівнянні з обчисленням, виконаним на основі аналітичної моделі (3), але вимагає значних часових затрат.

В цій роботі основними характеристиками випромінювання РСС є спрямовуючі властивості, ефективність яких потребує покращення. Параметром оцінки ефективності випромінювання РСС є КСД. Якщо напруженість поля не залежить від азимутального кута φ (випадок осьової симетрії ДС) для розрахунку КСД можна скористатися наступною формулою:

$$D = \frac{4\pi F^2(\theta_1)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta} \quad (9)$$

Сказане означає, що значення напруженості електричної складової електромагнітного поля в дальній зоні теоретично повинні бути незмінним при всіх значеннях кутів в кросполяризованій площині XOY для РСС (рис. 3а). Для підтвердження цього припущення проведено ряд експериментальних досліджень розподілу напруженості електричної складової електромагнітного поля в кросполяризованій площині в дальній зоні. Результати наведено на рис. 12 у вигляді нормованих за амплітудою ДС при кутах спостереження $\varphi = 0..180^\circ$, отриманих з використанням розробленого в цій роботі фізичного зразка РСС, в якому використано плазмовий розряд.

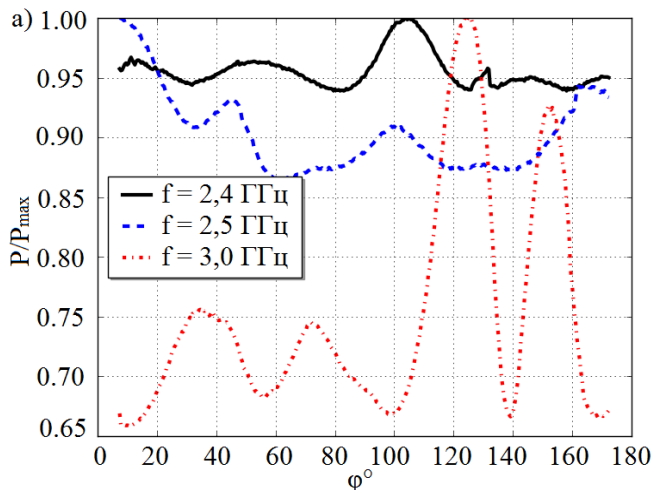


Рис. 12. Діаграми спрямованості ребристо-стержневої структури в кросполяризованій площині

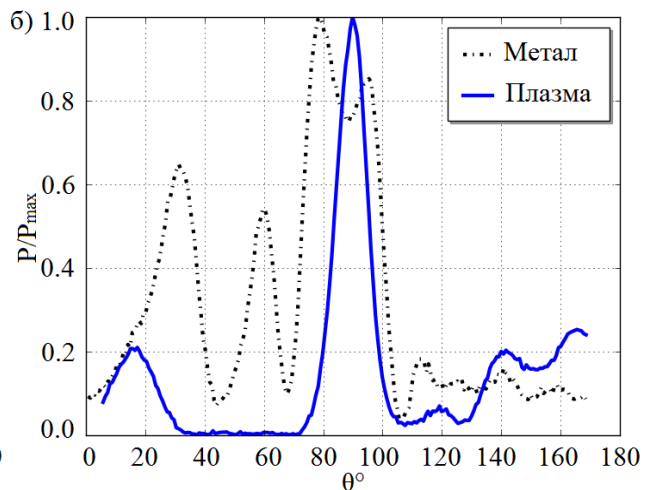


Рис. 13. Діаграми спрямованості ребристо-стержневих структур, виконаних на базі металевого стержня та плазмового розряду, в площині поляризації вектора напруженості електричного поля

Аналізуючи отримані експериментальні результати (рис. 12), робимо висновок, що на робочій частоті 2,4 ГГц, розподіл напруженості електричного поля в кросполяризованій площині прямує до прямолінійного в дальній зоні при кутах спостереження $\varphi = 0..180^\circ$, при цьому під час збільшення робочої частоти сигналу спостерігається збільшення відмінності цього розподілу від прямолінійного.

Для розрахунку КСД РСС з металевим стержнем та РСС на базі плазмового розряду досліджено нормовані за амплітудою ДС (рис. 13) в площині поляризації вектора напруженості електричного поля, отримані під час експерименту. На основі експериментально отриманих ДС, наведених на рис. 13 суцільною та пунктирною лініями, розраховано КСД, з використанням виразу (9), який рівний 3,15 дБ для РСС, виконаної на основі металевого стержня, та 6,72 дБ для РСС з використанням плазмового розряду.

Заміна металевого стержня газорозрядною лампою в РСС, ПІ якої модульований прямокутними імпульсами, що фізично являють собою металеві радіальні неоднорідності з параметрами, наведеними в таблиці 1, дала змогу підвищити КСД на 3,592 дБ. При цьому вдалося зменшити величину рівня бокового випромінювання на 3,840 дБ.

Шляхом чисельного моделювання досліджено ефект, пов'язаний з тим, що поперечне до головної осі РСС випромінювання зникає при відсутності плазмового розряду в структурі. Необхідність експериментальної перевірки такого ефекту зумовлена перспективами подальшого використання РСС, виконаної на базі плазмового розряду в галузі прихованої радіолокації.

На рис. 14 видно, що для РСС, розробленої на основі плазмового розряду, при заданих відносних конструктивних параметрах характерне поперечне випромінювання, що зникає, як і при чисельному моделюванні на основі

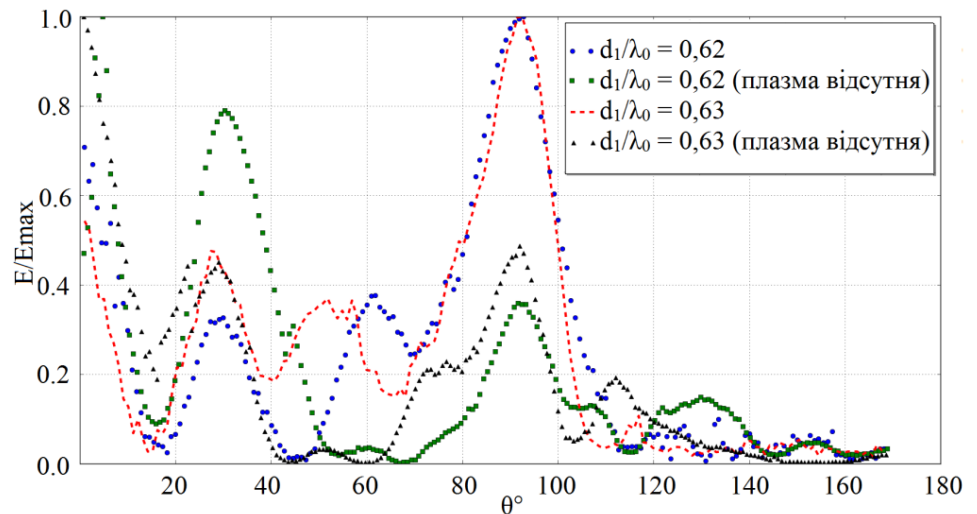


Рис. 14. Вплив наявності та відсутності плазми на форму розподілу напруженості електричного поля

методу скінченних елементів, при відсутності плазми в структурі. Ширина головних пелюсток становить 20° за рівнем 0,5. Оскільки ДС, зображені на рис. 9, розраховані по напрузі, а експериментально отримано ДС по потужності, це пояснює відмінність ширини головних пелюсток при їх порівнянні. Присутність незначного бокового випромінювання при значенні кута θ в межах $0..70^\circ$ можна пояснити інтерференцією двох ПЕХ: падаючої та відбитої від кінця структури внаслідок перевипромінювання металевими радіальними неоднорідностями РСС, а також випромінюванням, що утворене металевим рупором.

В завершенні розділу надано рекомендації щодо практичного втілення отриманих результатів у процес розроблення компонентів та засобів інфокомунікаційних систем, виготовлених на основі РСС з використанням плазмового розряду.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, яка полягає у підвищенні ефективності параметрів та характеристик випромінювання модульованих метал-діелектричних структур шляхом розроблення нового методу синтезу ребристо-стержневої структури на основі плазмового розряду та зміни параметрів модуляції поверхневого імпедансу, а також удосконаленні математичних та імітаційних моделей розрахунку розподілу електричної складової електромагнітного поля в дальній зоні.

1. Проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку засобів передавання електромагнітної енергії, робота яких основана на фізичних властивостях поверхневих плазмонів та плазми. Виявлено, що використання поверхневих плазмонів дає можливість конструювати аналітичні прецизійні прилади та пристрої. Встановлено, що використання плазмового розряду в антенній техніці НВЧ діапазону є перспективним напрямком, що зумовлено його значними перевагами над звичайними металевими та метал-діелектричними засобами. Це уможлиблює досягнення передачі інформації зі швидкістю 7 Гбіт/с за рахунок використання діапазону частот від 56 до 64 ГГц та відкриває нові можливості конструювання засобів прихованої радіолокації.

2. Розроблено модель РСС довжиною $4\lambda_0$ на основі методу наведених ЕРС, новизна якої полягає в тому, що така модель дає можливість врахувати вплив відбитої від кінця структури ПЕХ та коефіцієнт затухання на форму розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні. З метою автоматизації розв'язку задачі аналізу РСС, зокрема процесу дослідження її випромінювальних властивостей, розроблено прикладну комп'ютерну програму на базі інтерпретованої мови програмування «Python». У результаті дослідження розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні та аналізу оцінки середнього квадратичного відхилення встановлено, що використання математичної моделі, розробленої на базі методу наведених ЕРС для РСС, співрозмірних з довжиною хвилі, дозволило покращити стандартне відхилення параметра випромінювання на 0,1795.

3. Розроблено імітаційну модель РСС в технології HFSS з використанням методики розрахунку параметрів газорозрядної плазми на основі теорії Друде для розробки нового матеріалу, використання якого уможливило дослідження особливостей випромінювання РСС з використанням плазми. Методом скінченних елементів при 10-х встановлених ітераціях розраховано електродинамічні характеристики РСС в якій використано матеріал з параметрами газорозрядної плазми та отримано смугу робочих частот в частотному діапазоні 2..3 ГГц, яка складає 12% за рівнем КСХ < 2. Виявлено, що поперечне випромінювання відносно головної осі РСС спостерігається при значеннях конструктивного параметра $d_1/\lambda_0 = 0,58..0,72$.

4. Розроблено експериментальний зразок РСС, в якій замість металевого стержня використано газорозрядну лампу, що дало змогу методом порівняльного аналізу та оцінки середнього квадратичного відхилення провести верифікацію результатів, отриманих під час моделювання. Виявлено, що отримане значення амплітуди вектора напруженості електричного поля на 50% більше в напрямку, поперечному до головної осі досліджуваної структури, у порівнянні з результатом,

отриманим в умовах відсутності плазми в цій структурі. На основі експериментальних досліджень встановлено, що КСД РСС з використанням плазмового розряду рівний 6,72 дБ. Заміна металевого стержня плазмовим розрядом та модуляція III металевими радіальними неоднорідностями підвищили КСД РСС з відносною довжиною $4\lambda_0$ на 3,57 дБ та зменшили рівень бокового випромінювання на 3,84 дБ.

5. Встановлено, що для досягнення ефекту повного зникнення електромагнітного випромінювання РСС, співрозмірної з довжиною хвилі в умовах відсутності плазмового розряду, для потреби її застосування в засобах прихованої радіолокації можна за рахунок використання газорозрядної діелектричної трубки з ребристо-стержневою формою та відносними параметрами III $d_1/\lambda_0 = 0,58..0,72$ та $\Delta/\lambda_0 = 0,2..0,4$. Підвищити роздільну здатність в режимі сканування однопровеневої та двопрровеневої ДС в смузі робочих частот 2..3 ГГц можна за рахунок збільшення відносною довжини РСС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях:

1. Гоблик В.В. Моделювання плазмон-поляритонних структур з інтерференційним розподілом поля / В.В. Гоблик, І.В. Гадьо, О.М. Ліске, І.Ю. Тепляков // Журнал нано- та електронної фізики. – 2018. – Т.10, № 6. – 06022. (Scopus).

2. Гоблик В.В. Поле антенної решітки ромбічних випромінювачів на основі щільної лінії передавання / В.В. Гоблик, О.М. Ліске, І.Ю. Тепляков // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2017. – № 874. – С. 31–38. (Index Copernicus).

3. Тепляков І.Ю., Ліске О.М., Гадьо І.В., Маслаков С.О. Досвід розроблення та використання засобів інформаційних технологій на підставі метал-діелектричних структур та плазмового розряду // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: збірник науково-технічних праць. – 2018. – т. 28, № 8. – С. 95–100. (Index Copernicus).

4. Тепляков І.Ю. Моделювання плазмової ребристо-стержневої антени. – Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2018. – № 909. – С. 10–15. (Index Copernicus International).

5. Ivan Teplyakov, Viktor Hoblyk, Oleksiy Liske, Irina Gado, Serhiy Maslakov and Ivan Pylypiak. Synthesis of Plasma Corrugated-Rod Antenna for Multi-Gigabit Wireless Technology. Internet of Things (IoT) and Engineering Applications, Vol. 3, Issue 1, 2018. Pp. 34–43. (DOAJ, Google Scholar).

6. Teplyakov I.Yu. Modelling of the metal corrugated-rod antenna with transverse radiation. – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 3. – С. 109-115. (Index Copernicus).

Публікації у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій:

7. V. Hoblyk. Modelling Radiativ Properties of Metallodielectric Structures / V. Hoblyk, V. Pavlysh, N. Goblyk, I. Nychai, O. Liske, M. Zelenku, I. Teplyakov // Proceedings of the XIIIth International Conference “Modern Problems of Radio

Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET 2016). – Lviv-Slavske, 2016. – P. 105. (Scopus).

8. V. Hoblyk. Achievements in Antennas Research at Lviv Polytechnic National University / V. V. Hoblyk, V. A. Pavlysh, N.M. Hoblyk, Ye.I. Yakovenko, O. M. Liske, I. V. Nychai, D. V. Nevinskyi, D. A. Nikolayev, I. Yu. Teplakov // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine pp. 50-55. (Scopus).

9. Щадило Я.С. Вплив параметрів модульованої метал-діелектричної структури на роздільну здатність інтерферометра / Щадило Я., Ліске О., Жарий А., Тепляков І., Зіняк Б. (GEOFORUM 2018). – Львів-Яворів-Брюховичі 2018. – с. 107.

10. Щадило Я.С. Досвід та перспективи використання плазмового розряду в системах та засобах військового призначення / Щадило Я.С., Ліске О.М., Гресь М. В., Жарий А.А., Тепляков І.Ю., Євстафієв В.І. («Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ»). – Львів 2018. – с. 183.

11. Щадило Я.С. Моделювання плазмової ребристої стержневої антени для потреб прихованої радіолокації / Щадило Я.С., Ліске О.М., Верстівський А.А., Тепляков І.Ю., Зіняк Б.Б. («Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ»). – Львів 2018. – с. 183.

12. Щадило Я.С. Покращення характеристик антени на основі щільної лінії передачі, призначеної для прийому теплового випромінювання / Щадило Я.С., Ліске О.М., Піко О.Т., Тепляков І.Ю., Тарасенко Л.О. («Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ»). – Львів 2018. – с. 184.

АНОТАЦІЯ

Тепляков І.Ю. Підвищення ефективності ребристо-стержневої випромінювальної структури з використанням плазмового розряду. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний університет «Львівська Політехніка», Міністерство освіти і науки України, м. Львів, 2020.

У дисертаційній роботі розв’язано актуальне науково-практичне завдання розроблення методу підвищення ефективності випромінювання РСС шляхом використання плазмового розряду та зміни параметрів модуляції ПП. Для цього було використано математичне та імітаційне моделювання, яке дало змогу дослідити та виявити конструктивні параметри ПП РСС, співрозмірної з довжиною хвилі у вільному просторі, при яких досягається поперечне випромінювання, підвищити спрямованість якого вдалося заміною металевого стержня плазмовим розрядом. За допомогою високорівневої інтерпретованої мови програмування «Python» розроблено комп’ютерний засіб з використанням об’єктно-орієнтованої методології програмування, призначений для автоматизації розв’язку задачі аналізу РСС скінченних розмірів на основі методу наведених ЕРС.

Розроблено експериментальний зразок РСС довжиною $4\lambda_0$, в якій використано плазмовий розряд замість металевого стержня для верифікації розроблених моделей та оцінки підвищення її ефективності випромінювання. Отримана форма та

ефективні геометричні розміри РСС з використанням плазмового розряду підвищили КСД на 3,592 дБ у поперечному напрямку відносно головної осі структури.

Ключові слова: ребристо-стержнева структура, плазмовий розряд, математичне моделювання, імітаційне моделювання, метод наведених електричних сил, метод скінченних елементів, діаграма спрямованості.

АННОТАЦИЯ

Тепляков И.Ю. Повышение эффективности ребристо-стержневой излучающей структуры с использованием плазменного разряда. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерство образования и науки Украины, г. Львов, 2020.

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача разработки метода повышения эффективности излучения ребристо-стержневой структуры путем использования плазменного разряда и изменения параметров модуляции поверхностного импеданса. Для этого было использовано математическое и имитационное моделирование, которое дало возможность исследовать конструктивные параметры поверхностного импеданса ребристо-стержневой структуры, соразмерной с длиной волны в свободном пространстве, при которых достигается поперечное излучение, повысить направленность которого удалось заменой металлического стержня плазменным разрядом. С помощью высокоуровневого интерпретированного языка программирования «Python» разработана программа с использованием объектно-ориентированной методологии программирования, предназначенная для автоматизации решения задачи анализа ребристо-стержневой структуры конечных размеров на основе метода наводимых электродвижущих сил.

Разработан экспериментальный образец ребристо-стержневой структуры длиной $4\lambda_0$, в которой был использован плазменный разряд вместо металлического стержня для верификации разработанных моделей и оценки повышения ее эффективности излучения. Полученная форма и эффективные геометрические размеры ребристо-стержневой структуры с использованием плазменного разряда повысили коэффициент направленного действия на 3,592 дБ в поперечном направлении относительно главной оси структуры.

Ключевые слова: ребристо-стержневая структура, плазменный разряд, математическое моделирование, имитационное моделирование, метод наводимых электродвижущих сил, метод конечных элементов, диаграмма направленности.

ABSTRACT

Tepliakov I.Yu. Efficiency improvement of the radiative corrugated-rod structure using plasma discharge. – On the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of Ph.D. (candidate) degree in technical sciences on speciality 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication Means. –

Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

The thesis presents the contribution to the solution of the scientific and practical task of method development for increasing of a corrugated-rod structure radiation efficiency by plasma discharge using and modulation parameters changing of the surface impedance. Mathematical and simulation modeling was used for investigation of the surface impedance constructive parameters of the corrugated-rod structure which is proportionated to wavelength in free space for achievement of transverse radiation and as a result directivity had been improved by the metal rod replacing with plasma discharge. The author used high-level interpreted programming language «Python» for program development using object-oriented programming methodology for solution automation of the corrugated-rod structure problem analyzing with finite dimensions based on induced electromotive forces method.

An experimental model of the corrugated-rod structure has been designed where plasma discharge was used instead of a metal rod for developed models verification and evaluation of radiation efficiency increasing. The resulting shape and the effective geometric dimensions of the corrugated-rod structure based on plasma discharge increased the directivity by 3,592 dB in the transverse direction relative to the main axis of the structure.

Key words: corrugated-rod structure, plasma discharge, mathematical modeling, simulation, induced electromotive forces method, finite element method, radiation pattern.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДС	Діаграма спрямованості
ЕРС	Електро-рушійна сила
ККД	Коефіцієнт корисної дії
КСД	Коефіцієнт спрямованої дії
КСХ	Коефіцієнт стоячої хвилі
НВЧ	Надвисокі частоти
ПЕХ	Поверхнева електромагнітна хвиля
ПІ	Поверхневий імпеданс
РСС	Ребристо-стержнева структура

Підписано до друку 09.06.2020р. Папір офсетний. Друк на різогр.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 130 прим. Зам. №320

Друк СПДФО Марусич М.М.Свідоцтво №1252 від 30.12.1996

м. Львів, пл. Осмомисла, 5/11

тел./факс (032) 261-51-31.

email: interprint-m@ukr.net