

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МАРЧЕНКО СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.396.67

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІНТЕГРАЛЬНОГО  
РІВНЯННЯ ПРОНИЗУЮЧОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ  
РОЗРАХУНКУ ХВИЛЕВОДНИХ ФАР**

01.04.03 – Радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук**

Харків – 2016

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті ім. Олеся Гончара міністерства освіти та науки України, м. Дніпропетровськ.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Морозов Валентин Михайлович**  
Дніпропетровський національний університет  
ім. Олеся Гончара міністерства освіти та  
науки України, доцент кафедри електронних  
засобів телекомунікацій

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Горобець Микола Миколайович**,  
Харківській національний університет  
імені В. Н. Каразіна, завідувач  
кафедрою прикладної електродинаміки

доктор фізико-математичних наук, старший  
науковий співробітник,  
**Грибовський Олександр Володимирович**,  
Радіоастрономічний інститут Національної  
академії наук України, м. Харків, провідний  
науковий співробітник відділу теоретичної  
радіофізики

Захист відбудеться “ 29 ” червня 2016 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розіслано “ ” травня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Д 64.052.03

доктор технічних наук, професор



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Задачі дифракції електромагнітних хвиль на відкритих періодичних НВЧ структурах є класичними задачами електродинаміки НВЧ, розв'язок яких представлено у багатьох роботах. Дослідження електродинамічних характеристик нескінченної хвиле водної фазованої антенної решітки (ФАР) з узгоджуючою періодичною структурою (УПС) пов'язано зі створенням випромінюючого елемента для систем радіозв'язку, радіолокації, пристроїв неруйнуючого контролю параметрів матеріалів.

Розробка хвилеводних фазованих антенних решіток є громіздким та витратним процесом, тому теоретичне дослідження є важливою задачею при проектуванні таких пристроїв. Аналіз узгоджуючої структури для хвилеводної ФАР забезпечує зменшення витрат на етапі її проектування. Велика кількість робіт присвячена дослідженню узгодження хвилеводних ФАР з зовнішнім простором. Для узгодження використовуються діелектричні вставки, діафрагми, імпедансні фланці, індуктивні штирі та т.п. Необхідно відмітити, що використання УПС для узгодження хвилеводної ФАР на даний час не є вивченим та її аналіз в повній мірі не розглядався.

При розробці САПР НВЧ потрібно створення математичних методів, адекватних широким класам реальних технічних пристроїв, що дозволяють ефективно виконувати їх чисельний аналіз. Запропонований метод пронизуючої області є ефективним електродинамічним методом для розрахунку нерегулярних направляючих структур, розгалужувачів, дільників потужності і т.і., використання цього методу дозволяє будувати електродинамічні алгоритми для створення САПР складних радіофізичних систем.

На сучасному етапі розвитку методів розв'язку задач електродинаміки НВЧ актуальним методом є метод інтегрального рівняння. На основі цього методу разом з апаратом афінорних функцій Гріна були створені чисельні алгоритми розв'язку тримірних задач електродинаміки НВЧ. Побудова функції Гріна та складання інтегрального рівняння з використанням часткових областей, що стикаються, та використанням часткових областей, що перетинаються, є громіздкими на етапі створення математичного алгоритму розрахунку. В цих методах будуються афінорні функції Гріна для кожної часткової області, на які розбивається складна область визначення електромагнітного поля. Побудова афінорної функції Гріна для кожної часткової області та внесення її в інтегральне рівняння, виключення інтегральних представлень деяких часткових областей з метою зменшення кількості невідомих значно ускладнюють електродинамічний алгоритм розв'язку задачі.

В методі інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області, пов'язаної з джерелом збудження хвилі та часткових областей, необхідно будувати афінорну функцію Гріна тільки для однієї пронизуючої області. Далі використовуються граничні умови для часткових областей та

отримання інтегрального рівняння значно спрощується.

Цей метод доцільно застосовувати при дослідженні хвилеводних НВЧ структур, в яких є можливість виділення такої області визначення електромагнітного поля, яка буде пронизувати решту часткових областей, що призводить до інтегрального рівняння відносно пронизуючої області.

До теперішнього часу метод пронизуючої області застосовувався для розв'язання двовірних задач електродинаміки НВЧ, тому розвиток цього методу для розв'язання тривимірних задач електродинаміки НВЧ на прикладі чисельного дослідження плоских хвилеводних ФАР з узгоджувачами структурами є **актуальним**.

Математичні моделі, побудовані в дисертації, частково пов'язані з результатами, отриманими раніше такими вченими як N. Amitay, V. Galindo, C. P. Wu, R. Mittra, A. C. Іл'їнський, С. С. Chen, Н. J. Van Schaik, К. К. Chan, С. Л. Просвірнин, Л. М. Литвиненко, М. М. Горобец, О. В. Грибовський, В. М. Морозов, І. Г. Прохода.

**Зв'язок робіт з науковими програмами, планами та темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, що проводилися в Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара на кафедрі прикладної і комп'ютерної радіофізики: «Радіофізичні явища в структурах з імпедансними, нелінійними та фрактальними неоднорідними елементами» (№ держреєстрації 0106U000808), «Аналіз радіофізичних явищ в структурах з неоднорідними елементами частотно-часовими методами» (№ держреєстрації 0109U000152), «Аналіз радіофізичних явищ в структурах з неоднорідними елементами на основі концепції узагальнених резонансів» (№ держреєстрації 0112U000194). Здобуювач Марченко С.В. був виконавцем цих держбюджетних науково - дослідних робіт.

**Мета та задачі дослідження.** *Метою дисертаційної роботи* є розвиток нового методу чисельного аналізу процесу дифракції електромагнітної хвилі, а саме розвиток методу інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області.

Відповідно до поставленої мети дисертаційної роботи необхідно вирішити наступні завдання :

- провести аналіз обчислювальних методів на основі методу інтегрального рівняння для розв'язку задач електродинаміки НВЧ;
- розробити методику побудови функції Гріна для плоскошаруватого діелектричного заповнення в методі пронизуючої області, розробити підхід для отримання коректного кінцевого інтегрального рівняння при наявності діелектричного заповнення, що пов'язано з визначенням функції стороннього джерела;
- розвинути метод пронизуючої області для розв'язку тривимірних задач дифракції електромагнітної хвилі з апертурними неоднорідностями;
- чисельно дослідити модель плоскої хвилеводної ФАР з узгоджувачом

періодичною структурою. Визначити розміри узгоджуючої структури, що забезпечують найкраще узгодження для різних сіток розташування випромінювачів.

*Об'єкт дослідження* – процес дифракції електромагнітних хвиль на нескінченних плоских хвилеводних ФАР.

*Предмет дослідження* – електродинамічні моделі дифракції електромагнітних хвиль на нескінченних плоских ФАР.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач було використано метод інтегрального рівняння, математичний апарат електродинаміки НВЧ, апарат афінорних функцій Гріна, а також методи чисельного аналізу.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Запропоновано підхід для побудови функції Гріна з урахуванням плоскошаруватого діелектричного заповнення хвилеводу для методу пронизуючої області, а також підхід для отримання коректного кінцевого інтегрального рівняння за наявності діелектричного заповнення, що зв'язано з функцією стороннього джерела.

2. Вперше розв'язана двомірна задача дифракції електромагнітної хвилі на нескінченній лінійній ФАР з плоскопаралельних хвилеводів з узгоджуючою періодичною структурою та діелектричним заповненням.

3. Вперше методом пронизуючої області розв'язана тривимірна задача дифракції електромагнітної хвилі на плоскій хвилеводній ФАР.

4. Вперше розв'язана задача дифракції електромагнітної хвилі на ФАР з прямокутних хвилеводів з діелектричними шарами методом пронизуючої області.

5. Вперше розв'язана задача дифракції електромагнітної хвилі на ФАР з прямокутних хвилеводів УПС. Були визначені розміри узгоджуючої структури для трикутної та прямокутної сіток розташування хвилеводів, яка забезпечує узгодження в діапазоні частот від 5,45 до 5,85 ГГц та в секторі кутів сканування для трикутної сітки до  $60^\circ$  та для прямокутної сітки до  $80^\circ$ .

**Достовірність результатів** забезпечується коректністю математичної і фізичної постановок задач, всебічним тестуванням чисельних алгоритмів, а також співпадінням результатів розрахунків з результатами інших авторів в окремих випадках.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Представлено розвиток методу інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області для розв'язку задач дифракції електромагнітної хвилі на нескінченних хвилеводних ФАР з узгоджувачами пристроями.

2. Розроблено методику побудови функції Гріна для плоскошаруватого діелектричного заповнення в методі пронизуючої області, а також розроблено підхід для отримання коректного кінцевого інтегрального рівняння за наявністю діелектричного заповнення, що зв'язано з визначенням функції стороннього джерела.

3. Розроблено методику розв'язання електродинамічних задач та створено пакет програм що, дозволяють проводити аналіз плоских хвилеводних ФАР з узгоджувачами пристроями: з плоскошаруватими діелектричними заповненнями та узгоджуючою періодичною структурою.

4. Отримані чисельні результати аналізу довели доцільність використання ФАР з плоскопаралельних хвилеводів з УПС як з діелектричними заповненнями так і без них як ефективну узгоджуючу структуру.

5. Використання узгоджуючою періодичної структури для ФАР на прямокутних хвилеводах дозволяє отримати узгодження в широкому секторі кутів. Запропонована узгоджуюча структура має просте конструктивне виконання, оскільки не потребує залучення діелектричних шарів та вставок, що додатково зменшує вартість узгоджуючої структури.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора наступний: розробка методики [1], розробка математичної моделі, створення алгоритму розв'язку та обговорення результатів [2-4], постановка задачі, розробка методики розв'язання та створення алгоритму, розробка математичної моделі, аналіз отриманих результатів [5-7], постановка та чисельне вирішення задачі, створення алгоритму та машинного моделювання, аналіз отриманих результатів [8-10].

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи доповідалися та обговорювалися на наступних конференціях: 7-а Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» РТ-2011 (Севастополь, 11-15 квітня 2011), 8<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT '11 (Київ, 20-23 вересня, 2011), 11<sup>th</sup> International Conference on Modern Problems of Radioengineering, Telecommunications and Computer Science TCSET '2012 (Львів-Славське, 21-24 лютого, 2012), IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, ISAAT'13 (Одеса, 16-20 вересня, 2013).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 10 наукових роботах, серед яких 6 статей в спеціалізованих журналах та збірниках наукових робіт, статті [2, 4] опубліковано в журналі “Известия ВУЗов. Радиоэлектроника”, який перекладається за кордоном та включено до міжнародних наукометричних баз даних SCOPUS, INSPEC та тезисів доповідей на наукових конференціях - 4.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 155 сторінок, у тому числі 127 сторінок основного тексту. Список використаних джерел включає 119 найменувань робіт вітчизняних та закордонних авторів. Дисертація включає 55 рисунків та 13 таблиць, з яких 22 рисунків на 22 сторінках цілком займають всю площину сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету та задачі дослідження, зазначено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено інформацію про публікації за темою дисертації, її апробацію та структуру.

**У першому розділі** надано аналітичний огляд літературних джерел, що присвячені електродинамічному розрахунку плоских хвилеводних ФАР з великою кількістю випромінювачів. Розглянуто сучасні способи узгодження хвилеводної фазованої антенної решітки з вільним простором. Зроблено висновок, що в решітці, в якій відстань між випромінювачами більше половини довжини хвилі, має сенс застосовувати узгоджуючий пристрій в живлячому фідері випромінювача. З цих міркувань було запропоновано для дослідження новий узгоджуючий пристрій для нескінченної хвилеводної ФАР – узгоджуючу періодичну структуру.

Виконано огляд електродинамічних методів розрахунку нескінченних хвилеводних ФАР на основі інтегрального рівняння з використанням апарату функції Гріна. Було проведено порівняння методу часткових областей та методу часткових областей, які перетинаються, з методом пронизуючої області, а також представлено алгоритми їх побудови. В попередніх роботах метод пронизуючої області використовувався для розв'язку скалярних електродинамічних задач. Зроблено висновок про доцільність використання методу пронизуючої області для розв'язку тривимірних задач прикладної електродинаміки НВЧ на прикладі розрахунку хвилеводних ФАР.

Розв'язанням тестових задач розрахунку ФАР з плоскопаралельних хвилеводів при скануванні в Н- та Е- площинах підтверджено коректність та ефективність використання методу пронизуючої області. Результати розрахунку мають графічну точність з відомими результатами та добру збіжність. Зроблено висновок, що цей метод може бути використаний для дослідження діелектричного заповнення в хвилеводно-резонаторних структурах, а також для дослідження хвилеводних ФАР.

**У другому розділі** виконано теоретичне дослідження нескінченної ФАР з УПС та діелектричним заповненням (рис.1.). Одиничний осередок ФАР з УПС та діелектричним заповненням складається з основної решітки та підрешітки з такими ж геометричними розмірами поперечного перетину, розташованої на деякій відстані від неї з внутрішнім ( $\epsilon_1$ - $\epsilon_4$ ) та зовнішнім ( $\epsilon_5$ - $\epsilon_7$ ) діелектричним заповненням.

Для розв'язання електродинамічної задачі розроблено методики: побудови функції Гріна та функції стороннього джерела, а також отримання кінцевого інтегрального рівняння з урахуванням діелектричного заповнення для методу пронизуючої області. На прикладі тестових задач - розрахунку ФАР з плоскопаралельних хвилеводів з діелектричним шаром та діелектричною

вкладкою була представлена методика побудови функції Гріна та стороннього джерела електромагнітного поля в методі пронизуючої області.

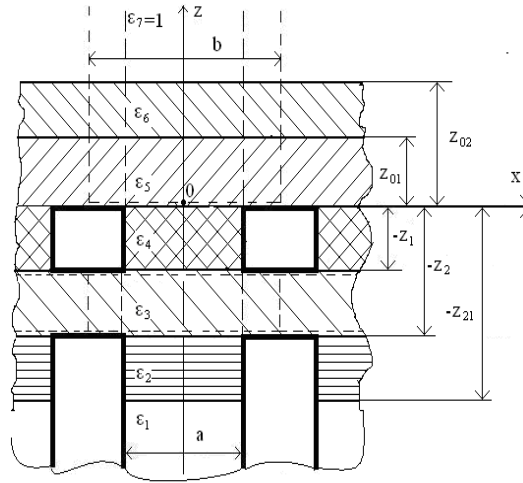


Рис.1. Одиничний осередок ФАР з УПС та діелектричним заповненням

Область визначення електромагнітного поля у обраному осередку було розділено на три області: I (пронизуюча) область — “хвилеводний канал” з діелектричним заповненням ( $\epsilon_1$ - $\epsilon_7$ ), II область — “канал Флоке” кінцевої довжини ( $\epsilon_3$ ), III область — напівнескінченний “канал Флоке” ( $\epsilon_5$ ,  $\epsilon_6$ ,  $\epsilon_7=1$ ). На основі другої формули Гріна отримуємо інтегральне представлення для визначення повного поля пронизуючої області:

$$\begin{aligned}
 E_y^{I(n)}(x, z) = & E_{y_{exc}}^{I(n)}(x, z) + \\
 & + \int_{-z_2}^{-z_1} \left\{ E_y^{II(3)}(x', z') \frac{\partial G_3^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=-\frac{a}{2}} - E_y^{II(3)}(x', z') \frac{\partial G_3^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=\frac{a}{2}} \right\} dz' + \\
 & + \int_0^{z_{01}} \left\{ E_y^{III(5)}(x', z') \frac{\partial G_5^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=-\frac{a}{2}} - E_y^{III(5)}(x', z') \frac{\partial G_5^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=\frac{a}{2}} \right\} dz' + \quad (1) \\
 & + \int_{z_{01}}^{z_{02}} \left\{ E_y^{III(6)}(x', z') \frac{\partial G_6^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=-\frac{a}{2}} - E_y^{III(6)}(x', z') \frac{\partial G_6^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=\frac{a}{2}} \right\} dz' + \\
 & + \int_{z_{02}}^{+\infty} \left\{ E_y^{III(7)}(x', z') \frac{\partial G_7^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=-\frac{a}{2}} - E_y^{III(7)}(x', z') \frac{\partial G_7^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=\frac{a}{2}} \right\} dz' \\
 & x \in \left[ -\frac{a}{2}, \frac{a}{2} \right]; \quad x' = \pm \frac{a}{2} \quad z' \in -z_1, z_2 \cup 0, z_{01} \cup z_{01}, z_{02} \cup z_{02}, +\infty
 \end{aligned}$$

де:  $E_y^{I(n)}(x, z)$  — тангенціальна компонента напруженості електричного поля пронизуючої області ( $n=1 \div 7$ );  $E_{y_{exc}}^{I(n)}(x, z)$  — стороннє джерело;  $E_y^{II, III(n)}(x, z)$  — тангенціальна компонента напруженості електричного поля II та III областей



( $n=3\div 7$ );  $G'_n(x, z; x', z')$  — функція Гріна нескінченного хвилеводу з плоскошаруватим діелектричним заповненням ( $n=1\div 7$ ).

При урахуванні діелектричних заповнень на відміну від МЧОП в методі пронизуючої області інтегральне рівняння будується відносно часткових областей з діелектричними заповненнями, що збільшує кількість невідомих СЛАР пропорційно кількості діелектричних шарів. Для виключення такої залежності було запропоновано прийом, в якому тангенціальні складові напруженостей електричного поля в діелектричних шарах виражаються через тангенціальні складові напруженостей електричного поля вільного простору на підставі рівності тангенціальних складових діелектричних шарів, що регулярно заповнюють поперечний розтин області визначення електромагнітного поля. Отримана СЛАР є системою другого роду, розмір якої не збільшується при збільшенні кількості шарів діелектричного заповнення. Для визначення коефіцієнту відбиття в хвилеводі з діелектричними вставками враховано поля падаючої та відбитої хвилі, що найближче до джерела стороннього поля.

Для розрахунку використано поперечні розміри плоскопаралельних хвилеводів ФАР без узгодження. Досліджено ФАР з УПС, отримані результати моделювання дозволили визначення повздовжніх розмірів УПС для решіток з різною товщиною стінок хвилеводів, що забезпечували узгодження із зовнішнім простором. В середньому модуль коефіцієнта відбиття при застосуванні УПС зменшується в 3-4 рази в секторі кутів сканування від  $0^\circ$  до  $60^\circ$ .

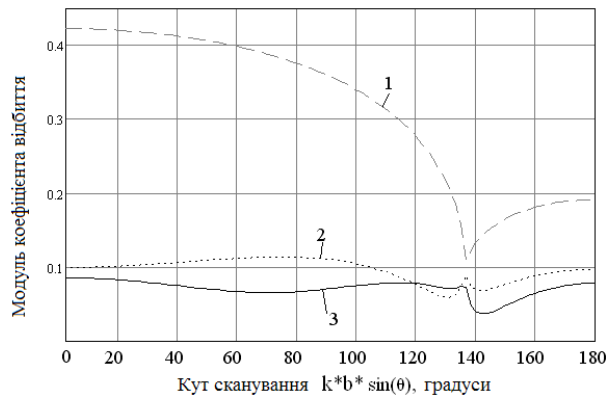


Рис. 2 Залежність модулю коефіцієнта відбиття від кута сканування у Н-площині при  $b/\lambda=0,6205$ ,  $a=0,88b$ : 1 —  $z_1=z_2=0$ ; 2 —  $z_1/\lambda=0,05$ ;  $z_2/\lambda=0,25$ ; 3 —  $z_1/\lambda=0,6$ ;  $z_2/\lambda=0,85$ ;  $\epsilon_4=1,4$ .

Дослідження ФАР з УПС та діелектричними заповненнями зрівнювалося з результатами для ФАР з УПС. Для випадку ФАР с поперечними розмірами  $a/\lambda=b/\lambda=0,5714$  співвідношення модулів коефіцієнтів відбиття — 0,12/0,14 для УПС з діелектричним заповненням/УПС без заповнення. УПС з діелектричним заповненням дає незначне поліпшення узгодження у порівнянні з УПС без заповнення. Для ФАР  $b/\lambda=0,5714$ ,  $a=0,937b$  УПС з діелектричним заповненням не дає зменшення модулю коефіцієнта відбиття порівняно з УПС без заповнення. Для ФАР з товстими стінками:  $b/\lambda=0,5714$  та

$a=0,88b$  УПС з діелектричним заповненням та без нього співвідношення модулів коефіцієнтів відбиття (з діелектриком /без діелектрику)  $-0,235/0,31$ .

Для  $b/\lambda = 0,6205$  та  $a=0,88b$  УПС з заповненням та без нього співвідношення модулів коефіцієнтів відбиття  $-0,085/0,115$ . УПС з діелектричним заповненням дає покращення узгодження на 35% (рис.2).

Результати ілюструють доцільність використання УПС, як з діелектричним заповненнями, так і без них, як узгоджуючи структуру для нескінчених ФАР та підтверджує доцільність дослідження узгодження хвилеводних ФАР за допомогою запропонованої узгоджуючої структури.

**В третьому розділі** розв'язано тривимірну задачу дифракції електромагнітної хвилі на плоскій нескінченій ФАР з прямокутних хвилеводів з трикутною сіткою їх розміщення методом пронизуючої області (рис. 3).

Інтегральне представлення для повного поля пронизуючої області  $S'$  на основі інтегральної теореми векторної теорії дифракції:

$$\vec{E}^I(r) = \vec{\nabla} \times \int_{S'} \vec{G}^I(r, r') \cdot [\vec{n}' \times E^I(r')] ds' \quad (2)$$

де:  $\vec{n}'$ - вектор внутрішньої нормалі до поверхні інтегрування,  $\vec{G}^I(r, r')$ - потенційна тензорна функція Гріна другого роду діагонального виду, що задовольняє рівнянню Гельмгольца та граничним умовам на провідній поверхні:

$$\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{G}^I(\vec{r}, \vec{r}') = 0; \quad \vec{n} \cdot \vec{G}^I(\vec{r}, \vec{r}') = 0.$$

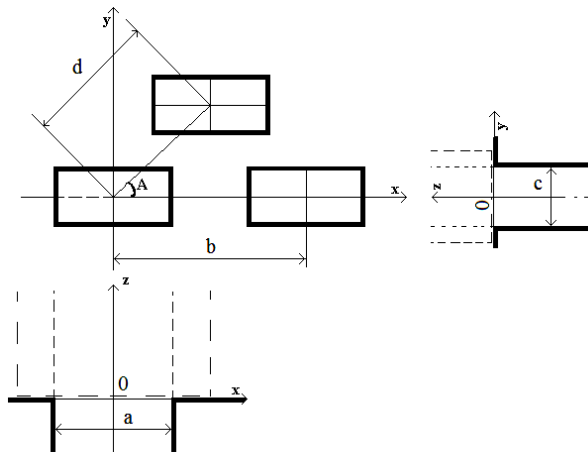


Рис.3 Геометрія плоскої ФАР з пронизуючою та частковою областями, що умовно виділяються

Використовуючи (2) для області I та фіксуючи точки спостереження при  $z=0$ , а також умову рівності тангенціальних компонент векторів напруженості електричного поля, отримано інтегральне рівняння Фредгольма другого роду:

$$\vec{E}'(x, y, z = 0) = \vec{E}'_{exc}(x, y, z = 0) + \left( \bar{x}_0 \frac{\partial}{\partial x} + \bar{y}_0 \frac{\partial}{\partial y} + \bar{z}_0 \frac{\partial}{\partial z} \right) \times$$

$$\left( \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_0^{\infty} \left\{ \vec{G}'(x, y, z = 0; x', \frac{-c}{2}, z') \left[ \bar{y}'_0 \vec{E}'(x', \frac{-c}{2}, z') \right] - \vec{G}'(x, y, z = 0; x', \frac{c}{2}, z') \left[ \bar{y}'_0 \vec{E}'(x', \frac{c}{2}, z') \right] \right\} dz' dx' + \right.$$

$$\left. + \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \int_0^{\infty} \left\{ \vec{G}'(x, y, z = 0; \frac{-a}{2}, y', z') \left[ \bar{x}'_0 \vec{E}'(\frac{-a}{2}, y', z') \right] - \vec{G}'(x, y, z = 0; \frac{a}{2}, y', z') \left[ \bar{x}'_0 \vec{E}'(\frac{a}{2}, y', z') \right] \right\} dz' dy' \right) \quad (3)$$

Чисельні результати (для решітки з геометричними розмірами в сантиметрах):  $a=3,5$ ;  $b=1,15$ ;  $c=5$ ;  $d \cdot \sin(A)=1,45$ ;  $d \cdot \cos(A)=2,5$  та частотою  $5,65$  ГГц надано в таблиці 1 у порівнянні з відомими даними. Проведено дослідження чисельної збіжності розв'язку та оптимізація чисельного алгоритму. При розрахунку використано 3 хвилеводні гармоніки ( $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{30}$ ) и 1891 "гармонік Флоке". Врахування більшої кількості мод вздовж вісі  $x=4,5,6$  та вісі  $y=1,2,3$  не змінювало третій знак після коми.

Порівняння отриманих чисельних результатів з відомими (Таблиця 1) підтверджує коректність запропонованого електродинамічного методу. Таким чином, на прикладі розв'язання тривимірної електродинамічної задачі представлено розвиток методу інтегрального рівняння на основі пронизуючої області. Отримані результати підтвердили доцільність використання цього методу для аналізу тривимірних задач дифракції, що було застосовано для аналізу плоскої хвилеводної ФАР з плоскошаруватим діелектричним заповненням та ФАР з УПС.

Таблиця 1

Метод дослідження		Кут сканування			
		$0^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$	$60^\circ$
V. Diamond	$ R $	0,185	0,27	0,478	0,702
	Arg(R), градуси	7,19	-6,49	-23,67	-33,98
Lee or sincos	$ R $	0,184	0,269	0,481	0,707
	Arg(R), градуси	9,63	-6,16	-24,27	-35,11
Cheby	$ R $	0,175	0,263	0,484	0,714
	Arg(R), градуси	13,21	-4,53	-24,36	-34,97
МЧПО	$ R $	0,175	0,257	0,468	0,694
	Arg(R), градуси	10,55	-6,72	-26,44	-37,06
МПО	$ R $	0,172	0,254	0,465	0,691
	Arg(R), градуси	10,63	-6,95	-26,80	-37,45

У четвертому розділі розглянута задача дифракції електромагнітної хвилі на плоскій хвилеводній ФАР з діелектричними шарами покриття, яка сканує у Н-площині (рис.4.). При розв'язанні даної тривимірної задачі існують особливості при складанні інтегрального рівняння порівняно з аналогічною задачею без діелектричного заповнення, а також відмінність у перерахуванні нормальних компонент векторів напруженостей електричного поля в

діелектричних шарах через аналогічні тангенціальні компоненти зовнішнього простору випромінювання.

Для зменшення кількості невідомих амплітудних комплексних коефіцієнтів виразимо тангенціальні компоненти  $\vec{E}^{II(III)}(x, y, z)$  через  $\vec{E}^{IV}(x, y, z)$ . Враховуючи умову відсутності сторонніх зарядів в шарах діелектриків над апертурою ФАР, використано умову  $\text{div}\vec{E}^{II(III,IV)}(x, y, z) = 0$ , що дозволяє виразити нормальні компоненти через тангенціальні, що зменшує розмір СЛАР. Отримані перераховані тангенціальні компоненти  $\vec{E}^{II(III)}(x, y, z)$  виражаємо через тангенціальні компоненти  $\vec{E}^{IV}(x, y, z)$ .

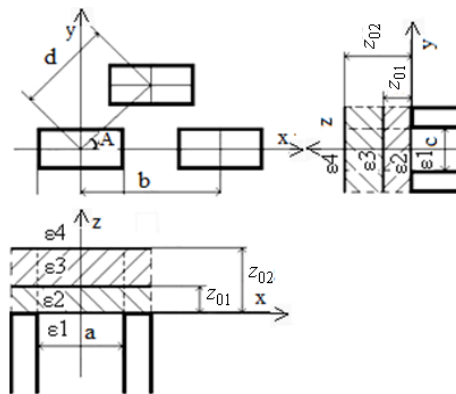


Рис.4 Геометрія ФАР з діелектричними шарами покриття

Подовжня компонента джерелоподібної функції Гріна для даної задачі враховує діелектричне заповнення; та вона отримана після диференціювання по вісіаналогічної функції, представленої у другому розділі.

Результати чисельного дослідження впливу діелектричних шарів на хвилеводну ФАР з геометричними розмірами зображено на рис.5:  $a/\lambda=0,66$ ;  $c/\lambda=0,159$ ;  $b/\lambda=0,856$ ;  $d/\lambda=0,249/\sin(30,2^\circ)$  та параметрами шарів:  $\epsilon=4$ ;  $z_{01}/\lambda=0,118$ ;  $z_{02}/\lambda=0,157$  при фіксованих кутах сканування. Номера кривих відповідають кутам сканування: 1-  $45^\circ$ , 2-  $60^\circ$ , 3-  $70^\circ$ . Числа без штриха – відомі результати, а зі штрихами – отримані.

На рис. бнаведено результати чисельного розрахунку (квадратики) та результати, отримані на хвиле водному Н–площинному симуляторі. Модуль коефіцієнта відбиття визначено автоматизованим симулятором, в якому кут сканування змінювався від  $23,6^\circ$  до  $70,3^\circ$  для частот від 2,75 до 6,5 ГГц. Для випадку ФАР без діелектричного шару криві позначені 1, з діелектричними шарами—2. Через відсутність в оригінальній роботі точної залежності кута сканування від частоти були отримані результати тільки для наведених значень кутів сканування та відповідних частот. При розв'язку СЛАР використано така ж кількість гармонік, як і в розділі 3.

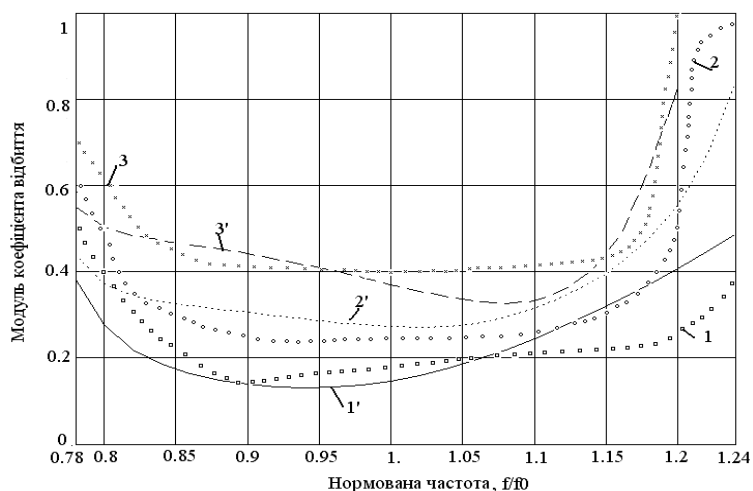


Рис.5. Залежність модулю коефіцієнта відбиття від нормованої частоти для ФАР з геометричними розмірами:  $a/\lambda=0,66$ ;  $c/\lambda=0,159$ ;  $b/\lambda=0,856$ ;  $d/\lambda=0,249/\sin(30,2^\circ)$  та параметрами узгоджуючого пристрою:  $\epsilon=4$ ;  $z_{01}/\lambda=0,118$ ;  $z_{02}/\lambda=0,157$

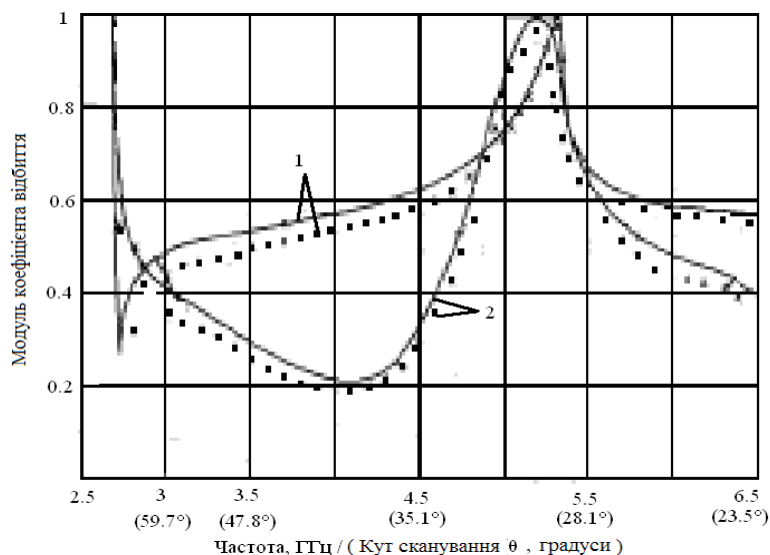


Рис.6 Залежність модулю коефіцієнта відбиття від частоти (кута сканування) для ФАР з розмірами в дюймах:  $a=2,20$ ;  $c=0,226$ ;  $b=2,26$ ;  $d=0,3575/\sin(30^\circ)$  та параметрами діелектричних шарів  $\epsilon=7,5$ ;  $z_{01}/\lambda=0,0276$ ;  $z_{02}/\lambda=0,0884$

В процесі чисельного аналізу проведено дослідження хвильоводних ФАР з узгоджувачами, що мають різні геометричні розміри та значення діелектричних проникностей та працюють в широкому діапазоні частот. Отримані чисельні результати розрахунку плоскої хвильоводної ФАР з діелектричними шарами мають графічну схожість з відомими результатами, що підтверджує коректність запропонованого електродинамічного методу і який може застосовуватися для аналізу хвильоводних ФАР з діелектричними заповненнями.

У п'ятому розділі проведено теоретичне дослідження нескінченної ФАР з прямокутних хвильоводів з УПС. На рис.7 зображена геометрія плоскої хвильоводної ФАР з УПС, виділені пронизуюча та дві часткові області I

область:  $-\infty < z < +\infty$ ; II область – “канал Флоке” кінцевої довжини  $:-z_2 \leq z \leq -z_1$ ; III область – зовнішній простір випромінювання ( напівнескінченний “канал Флоке”)  $: 0 \leq z < +\infty$ .

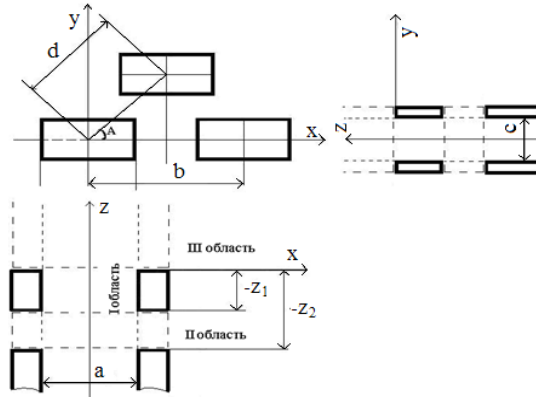


Рис.7 Геометрія плоскої хвильоводної ФАР з узгоджуючою періодичною структурою

Перевірку коректності побудованого алгоритму розрахунку нескінченної хвильоводної ФАР з УПС проведено шляхом порівняння з результатами третього розділу для ідентичної нескінченної ФАР без УПС.

При чисельному розрахунку взято поперечні геометричні розміри хвильоводів та “каналу Флоке” з третього розділу. Розміри  $z_1$  та  $z_2$  нормовані на  $\lambda$ , а нормування проведено відносно центральної частоти 5,65 ГГц.

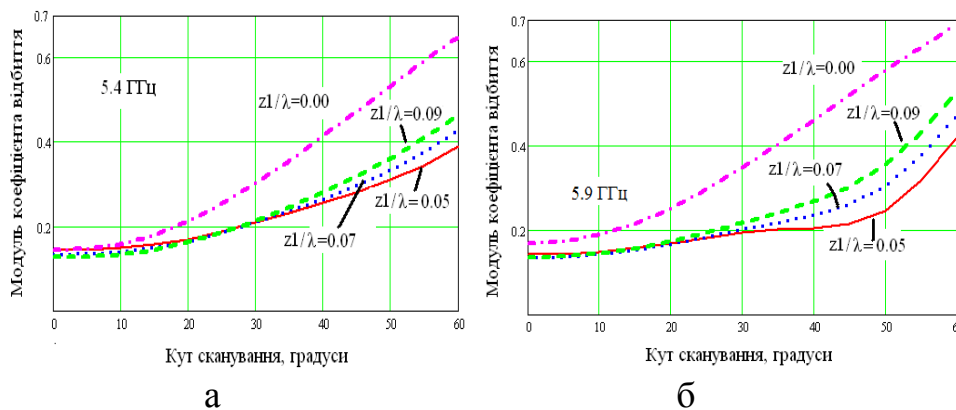


Рис. 8 Залежність модулю коефіцієнта відбиття від кута сканування для ФАР з УПС з трикутною сіткою розташування хвильоводів з кутом  $\Lambda=30,1^\circ$

На рис.8 а, б надано результати чисельного розрахунку для трикутної сітки розташування хвильоводів з кутом  $\Lambda=30,1^\circ$  на частотах збудження 5,4 (а) та 5,9 ГГц (б) для значень  $z_1/\lambda=0,01 \dots 0,1$ . З рисунків 8 а, б видно, що тільки при відносно малій відстані ( $z_1/\lambda \leq 0,1$ ) від площини апертури до області II можливо здійснити узгодження ФАР з зовнішнім простором. При цьому модуль коефіцієнта відбиття зменшується на 30-40%. Для того, щоб область II забезпечила найкраще узгодження, необхідно щоб довжина області II була у межах  $0,025\lambda \dots 0,057\lambda$ . «Осліплення» ФАР для трикутної сітки відсутнє.

Хвилеводну ФАР з прямокутною сіткою досліджено в діапазоні частот  $5,65 \pm 0,2$  ГГц. На рис.9 (а-в) зображено залежність модулю коефіцієнта відбиття від кута сканування для чотирьох розмірів  $z_1/\lambda$  ( $0,1; 0,6; 0,75; 0,85\lambda$ ) на частотах 5,45; 5,65; 5,85 ГГц та в секторі кутів сканування до  $80^\circ$ , при цьому модуль коефіцієнта відбиття зменшується в 1,5-2,5 рази. “Осліплення” ФАР, що досліджується, відсутнє. При виборі значень  $z_1$  та  $z_2$  враховано умову отримання для ФАР з УПС зменшення модуля коефіцієнту відбиття в середньому на 40% та більше порівняно з ФАР без УПС. Найкраще узгодження спостерігається при  $z_1/\lambda=0,1; z_2/\lambda=0,192$  в смузі частот від 5,45 ГГц до 5,85 ГГц. Модуль коефіцієнта відбиття є найменшим у порівнянні з другими значеннями  $z_1/\lambda$ . При  $z_1/\lambda=0,6; z_2=1,0565\lambda$  смуга частот 0,3 ГГц від 5,55 ГГц до 5,85 ГГц, а при значеннях  $z_1/\lambda=0,85; z_2/\lambda=0,94 - 0,3$  ГГц від 5,45 ГГц до 5,75 ГГц. Для  $z_1/\lambda=0,75; z_2/\lambda=0,905 - 0,2$  ГГц: від 5,55 ГГц до 5,75 ГГц.

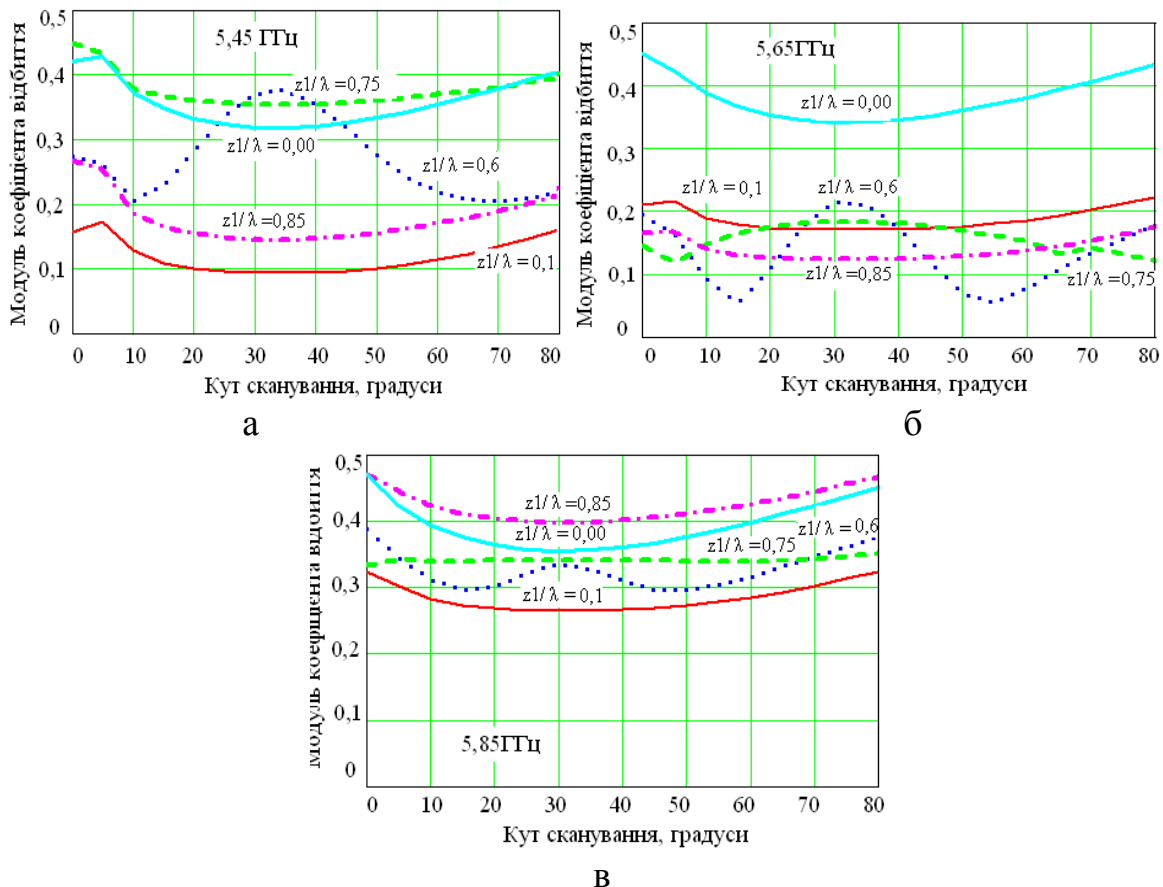


Рис.9 Залежність модулю коефіцієнта відбиття від кута сканування для ФАР з УПС та для прямокутної сітки розташування хвилеводів на частотах 5,45 (а), 5,65 (б) та 5,85 (в) ГГц

Таким чином, визначено розміри УПС: для трикутної сітки розташування хвилеводів модуль коефіцієнта відбиття зменшується в два рази в секторі кутів сканування від 0 до 40 градусів в діапазоні нормованих на довжину хвилі геометричних розмірів  $ka$  ( $a$  – широка стінка хвилеводу) від 3.958 до 4.325. Для прямокутної сітки модуль коефіцієнта відбиття зменшується в 1,5 ÷ 2,5 рази нормованих на довжину хвилі геометричних розмірів  $ka$  від 3.995 до 4.288 в кутів сканування від 0 до 80 градусів.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішено актуальну науково-прикладну задачу подальшого розвитку моделювання плоских хвилеводних ФАР методом інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області. Вона полягає в розробленні ефективної математичної моделі таких пристроїв, а також методики та алгоритмів аналізу, програмних засобів її реалізації.

Основні результати роботи і висновки з них можна сформулювати наступним чином:

1. Запропоновано методику побудови функції Гріна для плоскошаруватого діелектричного заповнення в методі пронизуючої області. Запропоновано підхід для отримання коректного кінцевого інтегрального рівняння за наявності діелектричного заповнення, зв'язаний з правильним визначенням функції стороннього джерела. Отримані чисельні результати для тестових випадків співпадають з графічною точністю з відомими, що свідчить про коректність методики побудови функції Гріна для методу інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області та електродинамічного алгоритму розрахунку.

2. Вперше проведено чисельне дослідження узгодження ФАР з плоскопаралельних хвилеводів з зовнішнім простором при використанні УПС. Для вхідних параметрів ФАР (нормованих на довжину хвилі геометричних розмірів) були чисельно визначені параметри УПС, що забезпечували узгодження. Модуль коефіцієнта відбиття при застосуванні УПС зменшується в 3-4 рази в діапазоні кутів сканування від  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . Зменшення модулю коефіцієнта відбиття при застосуванні УПС та діелектричного заповнення в порівнянні з УПС без заповнення складає 25-35% для деяких товщин стінок хвилеводів.

3. Вперше методом інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області розв'язано тривимірну задачу дифракції. Розглянуто задачу дифракції електромагнітної хвилі на плоскій нескінченній ФАР з прямокутних хвилеводів з трикутною сіткою їх розташування: побудовано електродинамічний алгоритм та виконано дослідження чисельної збіжності розв'язку. Порівняння отриманих результатів з відомими підтверджують коректність розробленого електродинамічного алгоритму.

4. Методом пронизуючої області вперше розв'язано тривимірну дифракційну задачу для нескінченної плоскої ФАР з прямокутних хвилеводів з трикутною сіткою їх розташування при наявності плоскошаруватого діелектричного заповнення. Наведено результати, що підтверджують коректність розробленого алгоритму розрахунку.

5. Вперше проаналізовано та чисельно досліджено тривимірну дифракційну задачу розрахунку нескінченної плоскої хвилеводної ФАР з УПС для випадку сканування в Н-площині методом пронизуючої області. Проведено чисельне дослідження та проаналізовано модель хвилеводної ФАР для трикутної та прямокутної сітки розташування випромінювачів. Були визначені



розміри УПС: для трикутної сітки розташування хвилеводів модуль коефіцієнта відбиття зменшується в два рази в секторі кутів сканування від 0 до 40 градусів в діапазоні нормованих на довжину хвилі геометричних розмірів  $ka$  ( $a$  – широка стінка хвилеводу) від 3.958 до 4.325. Для прямокутної сітки модуль коефіцієнта відбиття зменшується в 1,5 ÷ 2,5 рази нормованих на довжину хвилі геометричних розмірів  $ka$  від 3.995 до 4.288 в кутів сканування від 0 до 80 градусів.

## ПЕРЕЛІК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Морозов В. М. Применение метода интегрального уравнения для решения трехмерных дифракционных задач / В. М. Морозов, В. И. Магпо, С.В. Марченко // Вісн. ДНУ. Сер. Фізика. Радіоелектроніка. – 2006. – Випуск 13, №2/3. – с. 15 – 19.

2. Marchenko S.V. Electrodynamics Calculation of Plane Waveguide Phased Array with Penetrating Area Method // S.V. Marchenko, V.M. Morozov // Radioelectron. Commun. Syst. – 2009. – vol. 52, No. 9 – pp.483–487.

3. Марченко С. В. Исследование бесконечной волноводной ФАР с согласующей периодической структурой / С. В. Марченко, В. М. Морозов // 7-я Межд. молодёжная науч.- тех. конф. “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (РТ-2011), Севастополь, Апр. 11 – 15, 2011г. : Мат. конф. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – с. 234.

4. Marchenko S.V. Electrodynamics Calculation of an Infinite Waveguide PAA with Matching Periodic Structure // S. V. Marchenko, V. M. Morozov // Radioelectron. Commun. Syst. – 2011. – vol. 54, No.6 – pp.325–330.

5. Marchenko S. V. Application of penetrating area method to calculate waveguide phased antennas array with magnetic-dielectrical materials / S. V. Marchenko, V. M. Morozov // The Eighth International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT '11), Kyiv (Ukraine), Sept. 20 – 23, 2011. – Kyiv: 2011. – pp.275 – 277.

6. Марченко С.В. Электродинамический расчет волноводных ФАР с магнитодиэлектрическим заполнением методом пронизывающей области / С.В.Марченко, В.М.Морозов, А.М.Сьянов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-тех.сб.–2011. –Вып.167.–с. 5-9.

7. Marchenko S. V. Numerical investigation of linear waveguide PAA with dielectrically filled matching periodical structure/S. V. Marchenko, V. M. Morozov, O.M Syanov / The 11th Int. Conf. on Modern Problems of Radioengineering, Telecom and Comp. Science (TCSET '2012). – Lviv-Slavske: 2012. – pp.539–541.

8. Марченко С. В. Исследование ФАР с диэлектрическим заполнением и согласующей периодической структурой / С. В. Марченко, В. М. Морозов, А. М. Сьянов // Радиотехника: Всеукр.Межвед. Науч.- тех.сб. – 2012. – Вып. 171. – с. 229-233.

9. Марченко С. В. Электродинамический расчет линейной ФАР с согласующей периодической структурой //С. В. Марченко, В. М. Морозов // Радиоелектроніка, Інформатика, Управління – 2013 – Вип. 1. – с. 21-23.

10. Marchenko S. V. Numerical analyses of planar waveguide PAA with external dielectrical sheets by penetrating area method / S. V. Marchenko, V. M. Morozov, O. M. Syanov // Proc. 9th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT '13). – Odessa: 2013. – p.55–57.

## АНОТАЦІЯ

Марченко С.В. Застосування методу інтегрального рівняння пронизуючої області для розрахунку хвилеводних ФАР.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 -радіофізика. – Національний університет радіоелектроніки МОН України, Харків, 2016.

У дисертаційній роботі поставлено та вирішено актуальну науково-прикладну задачу розвитку моделювання плоских хвилеводних ФАР методом інтегрального рівняння на основі виділення пронизуючої області.

Теоретично досліджено лінійні ФАР з плоскопаралельних хвилеводів з УПС та діелектричним заповненням методом пронизуючої області. Показано особливості врахування діелектричного заповнення при складанні інтегрального рівняння, отримано чисельні результати, що підтверджують коректність побудованих алгоритмів та властивості узгоджуючої структури.

Розв'язані тривимірні задачі розрахунку дифракції електромагнітної хвилі на хвилеводних ФАР. Для тривимірних задач з врахуванням діелектричного заповнення виявлено особливості складання алгоритму розрахунку: визначення афінорної функції Гріна, перерахунок нормальних компонент векторів напруженості поля через тангенціальні компоненти, визначення функції стороннього джерела поля.

Вперше чисельно досліджено плоску хвилеводну ФАР з УПС. Для трикутної сітки розташування хвилеводів модуль коефіцієнта відбиття зменшується в два рази в секторі кутів сканування від 0 до 40 градусів в діапазоні нормованих на довжину хвилі геометричних розмірів  $ka$  ( $a$  – широка стінка хвилеводу) від 3.958 до 4.325. Для прямокутної сітки модуль коефіцієнта відбиття зменшується в 1,5 ÷ 2,5 рази нормованих на  $ka$  від 3.995 до 4.288 в кутів сканування від 0 до 80 градусів.

Ключові слова: фазована антенна решітка, інтегральне рівняння, метод пронизуючої області, функція Гріна, узгоджуюча періодична структура, дифракція електромагнітних хвилі.

## АННОТАЦИЯ

Марченко С.В. Применение метода интегрального уравнения пронизывающей области для расчета волноводных ФАР.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Национальный университет радиоэлектроники министерства образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена теоретическому исследованию дифракции электромагнитных волн на бесконечных плоских ФАР из прямоугольных волноводов методом интегрального уравнения на основе выделения пронизывающей области. В работе решена актуальная научно-прикладная задача развития метода интегрального уравнения на основе выделения пронизывающей области для анализа плоских ФАР из прямоугольных волноводов с согласующими устройствами.

Разработана методика построения функции Грина для плоскостойкого диэлектрического заполнения в методе пронизывающей области (МПО). Предложен подход для получения корректного итогового интегрального уравнения при наличии диэлектрического заполнения, связанный с определением функции стороннего источника.

Исследовано согласование ФАР из плоскопараллельных волноводов с внешним пространством за счет применения согласующей периодической структуры (СПС). Модуль коэффициента отражения при использовании СПС уменьшается в 3-4 раза в диапазоне углов сканирования от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . При сравнении согласования ФАР с СПС и диэлектрическим заполнением с СПС без заполнения было показано, что СПС с диэлектрическим заполнением обеспечивает уменьшение модуля коэффициента отражения на 25-35% для некоторых толщин стенок волноводов.

Развитие МПО, который ранее применялся для расчета скалярных задач проведено на примере решения трехмерных задач дифракции. Была рассмотрена задача дифракции электромагнитной волны на плоской бесконечной ФАР из прямоугольных волноводов с треугольной сеткой их расположения: построен электродинамический алгоритм и проведено исследование численной сходимости решения. Был выполнен электродинамический расчет трехмерной задачи для бесконечной плоской волноводной ФАР при наличии плоскостойкого диэлектрического заполнения. Сравнения результатов решения этих трехмерных задач с известными подтверждают корректность разработанных электродинамических алгоритмов расчета на основе МПО.

Численно исследована бесконечная волноводная ФАР с СПС при сканировании в  $H$ -плоскости. Для треугольной сетки расположения излучателей модуль коэффициента отражения уменьшается в два раза по сравнению с ФАР без СПС в секторе углов сканирования от 0 до 40 градусов в диапазоне нормированных на длину волны геометрических размеров  $ka$  ( $a$  –

размер широкой стенки волновода) от 3.958 до 4.325. Для прямоугольной сетки модуль коэффициента отражения уменьшается в  $1,5 \div 2,5$  раза в диапазоне нормированных на длину волны геометрических размеров  $ka$  от 3.995 до 4.288 в секторе углов от 0 до 80 градусов.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, интегральное уравнение, метод пронизывающей области, функция Грина, согласующая периодическая структура, дифракция электромагнитных волн.

## ABSTRACT

Marchenko S.V. Application of the integral equation method of the penetrating area to calculate the waveguide phased-array antenna.

Thesis for candidate of physical and mathematical sciences by speciality 01.04.03 - radiophysics. –Kharkiv National University of Radioelectronics Education and Science Ministry, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the the actual scientifically-applied task of the theoretical investigation of electromagnetic wave diffraction on the infinite waveguide phased-array antenna (PAA) by application of the penetrating area method(PAM).

The linear plane-waveguide PAA with dielectrically filled matching periodical structure (PMS) is investigated. Matching of PAA with free space using of PMS with increasing thickness of the waveguide becomes more noticeable and the decrease in the modulus of the reflection coefficient using PMS with dielectric inclusions in comparison without the filling is 25-35%.

3D problems of electromagnetic field radiation from planar infinite PAA is computed by the PAM. Boundary problem is stated in form of the second genus Fredholm's integral equation on a basis of PAM. Convergence of numerical results was analyzed and comparison of obtained results with known data was carried out. Calculation of 3D radiation problem of infinite planar rectangular waveguide PAA with external dielectrical sheets by PAM is carried out.

A three dimensional problem of electromagnetic field radiation from planar infinite PAAwith PMS is computed. An affect of the dimensions on matching PAA with free space is investigated in frequency band and scanning angels ratio. Investigation of frequency characteristics of PAA with matching structure for triangular and rectangular radiators lattice was conducted.

Ключові слова: waveguide, phased-array antenna, integral equation, penetrating area method, matching periodical structure, electromagnetic wave diffraction.

Підп. до друку 24.05.16.      Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.      Спосіб друку – ризографія  
Умов. друк. арк. 1,2.      Тираж 100 прим.      Ціна договірна.  
Зам. 1/24 від. 24.05.16

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.  
61166, Харків, вул. Серпухова,4  
Свідоцтво про державну реєстрацію  
Серія В00№ 9666085 від 30.05. 2003 р.