

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Юпіков Олег Олександрович



УДК 621.396.67

**РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ
ГІБРИДНОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ
З ШИРОКИМ ПОЛЕМ ОГЛЯДУ**

05.12.07 — антени та пристрої мікрохвильової техніки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків — 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Севастопольському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Щекатурін Андрій Олексійович
Севастопольський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Лучанінов Анатолій Іванович
Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри основ радіотехніки

доктор фізико-математичних наук, професор
Токарський Петро Львович
Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України,
провідний науковий співробітник відділу радіоастрономічної апаратури та методів спостережень

Захист відбудеться "6" червня 2013 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розіслано 4 травня 2013 р.

Вчений секретар



спеціалізованої вченої ради

В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

В даний час активно розробляються радіотелескопи з великим полем огляду, сформованим кількома променями, що перекриваються. Для формування такого поля огляду використовуються гібридні антени. Такі радіотелескопи дозволяють значно збільшити швидкість огляду в порівнянні з традиційними однопроменевими радіотелескопами.

Зокрема, за такою схемою будується антенна система радіотелескопа *APERITIF (APERture Tile In Focus)* — дзеркальна антенна система з фокальною решіткою, розробку якої веде інститут *ASTRON (The Netherlands Institute for Radio Astronomy)*. Мета цього проекту — замінити традиційні рупорні опромінювачі Вестерборгського радіотелескопу-інтерферометра (*Westerbork Synthesis Radio Telescope — WSRT*) на фокальні решітки, що призведе до збільшення швидкості огляду приблизно в 20 разів. Завершення проекту планується в 2013 році.

Система прийому сигналу і керування променями включає дзеркальний рефлектор, антенну фазовану фокальну решітку, мікросмушкові фідери елементів решітки, малошумливі підсилювачі (МШП) та формувач діаграми спрямованості (ДС). Ця система визначає якість роботи радіотелескопа.

На даний час не існує єдиної моделі, яка описує роботу такої системи.

Таким чином, актуальною є тема дисертаційних досліджень, направлених на розробку простої й ефективної математичної та програмної моделей системи прийому сигналів та управління променями, рішення якої дозволить розраховувати основні характеристики та параметри системи, а також проводити її параметричну оптимізацію.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, проведені в дисертації, використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт на кафедрі радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету. Результати дисертаційної роботи відображені в наступних науково-дослідних розробках: держбюджетна НДР «Розробка малоелементних антенних решіток і способів автоматизації вимірювань їх електродинамічних характеристик», шифр «Парус», № ГР 0108U002231 — 2009 р.; держбюджетна НДР «Оптимізація антенних решіток гібридних дзеркальних антен для радіотелескопів», шифр «Астра», № ГР 0110U003417 — 2011 р.

У цих НДР дисертант був виконавцем.

Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка моделі гібридної антенної системи з фокальною решіткою, що включає малошумливі підсилювачі та формувач діаграми спрямованості, оптимізація параметрів гібридної дзеркальної антени,

аналіз дослідного зразка антенної решітки *APERTIF* за допомогою розробленої моделі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

— розробляється математична модель антенної системи з фокальною решіткою, з малошумливими підсилювачами і формувачем діаграми спрямованості і її комп'ютерна модель, реалізована за допомогою пакету *CAESAR*;

— розраховуються основні параметри системи на основі створеної моделі;

— виконується оптимізація вагових коефіцієнтів решітки для заданих критеріїв оптимізації;

— здійснюється експериментальна перевірка адекватності моделі системи.

Об'єкт дослідження: процес формування багатопроменевого поля огляду радіотелескопу, а також процеси, що відбуваються при цьому в системі.

Предмет дослідження: окремі частини антенної системи (мікросмужний фідер елемента Вівальді, антенна решітка з елементів Вівальді) і вся система в цілому, її характеристики випромінювання (діаграми спрямованості променів, коефіцієнти використання поверхні), матриця опорів між антенними елементами решітки, шумові характеристики системи, чутливість у полі огляду.

Методи дослідження. У роботі використані наступні методи досліджень і моделі: метод характеристичних базисних функцій (розширення методу моментів) — для аналізу розподілу струмів у решітці і подальшого розрахунку характеристик випромінювання окремих елементів решітки в присутності інших елементів; еквівалентна модель системи — для аналізу шумових характеристик системи, яка складається з антенної решітки та приймача; комп'ютерне моделювання — для розрахунку і дослідження параметрів комплексної системи; експериментальні дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблені математична і комп'ютерна моделі системи прийому сигналу і керування променями, яка відрізняється від раніше відомих моделей тим, що враховує сукупний вплив дзеркального рефлектора, антенної фазованої фокальної решітки, мікросмужкових фідерів елементів решітки, малошумливих підсилювачів та формувача діаграми спрямованості, що дозволяє виконувати чисельне моделювання електродинамічних і шумових характеристик системи.

2. Вперше розроблено алгоритм оптимізації параметрів антенної системи з фокальною решіткою, що відрізняється використанням критеріїв узгодження по полю, максимальної чутливості без обмежень за напрямками і максимальної чутливості з обмеженнями щодо напрямків.

3. Удосконалено математичну модель мікросмужкового фідера для антенних елементів Вівальді, яка відрізняється від відомої моделі Кнорра урахуванням ємності щілини. Вперше знайдено оптимальне значення коефіцієнта трансформації для цієї моделі, що дозволило отримати мінімальне значення коефіцієнта відображення та розрахувати ефективну ширину щілини

антенного елемента Вівальді.

4. Вперше отримані значення оптимальних вагових коефіцієнтів антенної решітки, що дозволяють отримати задану величину рівномірності чутливості в багатопроменевому полі огляду телескопа.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Для розробленої моделі запропоновані методики розрахунку найважливіших характеристик радіотелескопів, таких як шумова температура системи та її складові, коефіцієнт використання поверхні та його складові, розподіл чутливості в полі огляду, та ін.

2. Модель була використана для розрахунку параметрів Вестерборгського радіотелескопа, одна з антен якого обладнана антеною решіткою з елементів Вівальді, і результати порівняні з вимірами, проведеними на цій антені. Отриманий хороший збіг результатів підтверджує практичну значимість роботи, оскільки модель може бути використана для передбачення поведінки та характеристик системи до її дорогого виготовлення.

3. Розроблена інженерна програма для розрахунку й аналізу характеристик дзеркальних антен з фокальними решітками, а також оптимізації вагових коефіцієнтів решіток за заданим користувачем критерієм.

4. Модель може бути використана для розробки нових ефективних технік калібрування радіотелескопів.

5. Результати теоретичних і експериментальних досліджень у вигляді розрахункових методик були впроваджені у Нідерландському інституті радіоастрономії *ASTRON* у проекті *APERTIF*, а також у Севастопольському конструкторському бюро радіозв'язку ТОВ «Телекарт-прибор».

Обґрунтованість та достовірність результатів

Достовірність теоретичних досліджень обумовлена коректним використанням відомих методів розрахунку параметрів антенних систем при теоретичних дослідженнях і хорошим збігом результатів цих досліджень з експериментальними даними. Достовірність експериментальних досліджень обумовлена застосуванням високоточних вимірювальних приладів, які пройшли перевірку в органах Держстандарту.

Особистий внесок здобувача

Автор самостійно отримав основні результати дисертаційної роботи. У роботах, виконаних у співавторстві, автору належать наступні результати: у роботі [1] здобувачем запропоновано метод знаходження невідомого параметра (коефіцієнта трансформації) моделі пристрою живлення антени Вівальді; в роботі [2] здобувачем виконано моделювання багатоелементної антенної решітки, розраховані діаграми спрямованості її елементів і матриця опорів між портами решітки; в роботі [3] здобувачем розроблено алгоритм роботи системи, що складається з дзеркального рефлектора, фазованої фокальної решітки та малешумливих підсилювачів, проведено моделювання дослідного зразка

системи *APERTIF*, розраховані вагові коефіцієнти антенної решітки за трьома критеріями оптимізації при одночасному формуванні 37 променів, що перекриваються, а також розраховані основні параметри телескопа та проведено порівняння розрахованої чутливості системи з вимірною; в роботі [4] здобувачем проведено аналіз залежності чутливості багатопроменевої дзеркальної системи з фокальною решіткою від числа прийомних каналів (активних елементів решітки); в роботі [5] здобувачем розроблена методика розрахунку чутливості антенної системи та показані перші результати її розрахунку і вимірювань; в роботі [6] здобувачем досліджено метод пошуку коефіцієнта трансформації в моделі пристрою живлення антени Вівальді; в роботі [7] здобувачем запропонована електромагнітна модель решітки для проекту *APERTIF* з використанням відомого способу електромагнітного моделювання великих кінцевих решіток; в роботі [8] здобувачем проведено аналіз впливу похибки у ширині щілини при виготовленні антенних елементів типу Вівальді на імпеданс решітки з антенних елементів Вівальді; в роботі [9] здобувачем проведено моделювання антенної решітки та проведено порівняння розрахованої матриці опору між її портами з вимірною; в роботі [10] здобувачем розроблена методика розрахунку чутливості антенної системи та наведено результати розрахунку і вимірювань для Вестерборгського радіотелескопа; в роботі [11] здобувачем проведено розрахунок коефіцієнта корисної дії (ККД) антенної решітки та деяких складових її шумової температури для декількох критеріїв оптимальності формованих променів; в роботі [12] здобувачем проведено аналіз чутливості антенної системи у полі огляду для критерію максимальної чутливості, особливу увагу приділено точкам перетину сусідніх променів; в роботі [13] здобувачем запропоновано використовувати метод формування променів з обмеженнями для спрощення калібрувальної моделі при розрахунку діаграм спрямованості антени телескопа, проведено порівняння між теоретичними та експериментальними результатами.

Апробація результатів дисертації

Результати роботи докладалися та обговорювалися на наступних міжнародних конференціях: 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS'2008 (Sevastopol, 2008); 3-ій міжнародній конференції «Проблеми телекомунікацій ПТ-2009» (Київ, 2009); 5-ій міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2009» (м. Севастополь, 2009); 13-му молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (м. Харків, 2009); Int. Symposium On Antennas and Propagation APSURSI '09 (Charleston, SC, USA, 2009); 4th and 5th European Conference On Antennas and Propagation EuCAP (Barcelona, 2010 and Rome, 2011); International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications ICEAA'2010 (Sydney, 2010).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 3 статті в спеціальних виданнях з переліку ВАК України, 2 статті у

IEEE Transactions on Antenna and Propagation та 8 робіт у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг роботи складає 162 сторінки, у тому числі: 63 рисунка (12 аркушів містять тільки рисунки). Список використаних джерел містить 109 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, виявлені невирішені теоретичні та практичні питання, що стоять перед розробниками антен радіотелескопів, сформувані мета та задачі досліджень. Охарактеризована наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Наведена структура дисертації та анотація її розділів.

У **першому розділі** проведено огляд антенних систем сучасних радіотелескопів *SKA* і *APERITIF*, що розробляються в даний час.

Зроблено огляд опромінювачів, що використовуються в антенних системах радіотелескопів. Показано доцільність використання щільних антенних решіток в якості опромінювачів, оскільки це дозволяє формувати широке багатопроменеве безперервне поле огляду радіотелескопа.

Проаналізовано методики калібрування антенних систем радіотелескопів.

Обґрунтовано вибір методу характеристичних базисних функцій для моделювання антенної решітки з елементів Вівальді, використовуваної в якості опромінювача.

Проведено аналіз використання методів розрахунку оптимальних вагових коефіцієнтів для елементів решітки: методу узгодження по полю, методу максимізації чутливості та методу максимізації чутливості з обмеженнями щодо напрямків.

Обґрунтовано потребу у створенні простої й ефективної моделі гібридної антенної системи, що дозволило б розраховувати характеристики системи, а також проводити її параметричну оптимізацію.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений розробці математичної та програмної моделей антенної системи та їх оптимізації. У цьому розділі проведено електромагнітне моделювання металевої структури решітки методом характеристичних базисних функцій, в результаті якого були розраховані діаграми спрямованості антенних елементів решітки з урахуванням впливу інших елементів при порушенні джерелом напруги (рис. 1).

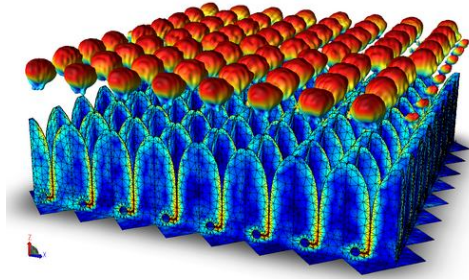


Рис. 1. Розраховані в програмі CAESAR розподіл струму і ДС окремих елементів решітки

Розрахована матриця опорів антенної решітки без мікросмужкового фідера (МСФ), тобто опір між портами кожного з металевих елементів решітки. Розрахунок проводився в програмі *MATLAB*.

Розроблено вдосконалена модель мікросмужкового фідера, застосованого для живлення антен типу Вівальді (рис. 2), а також виконана оптимізація його параметра — коефіцієнта трансформації прямим методом.

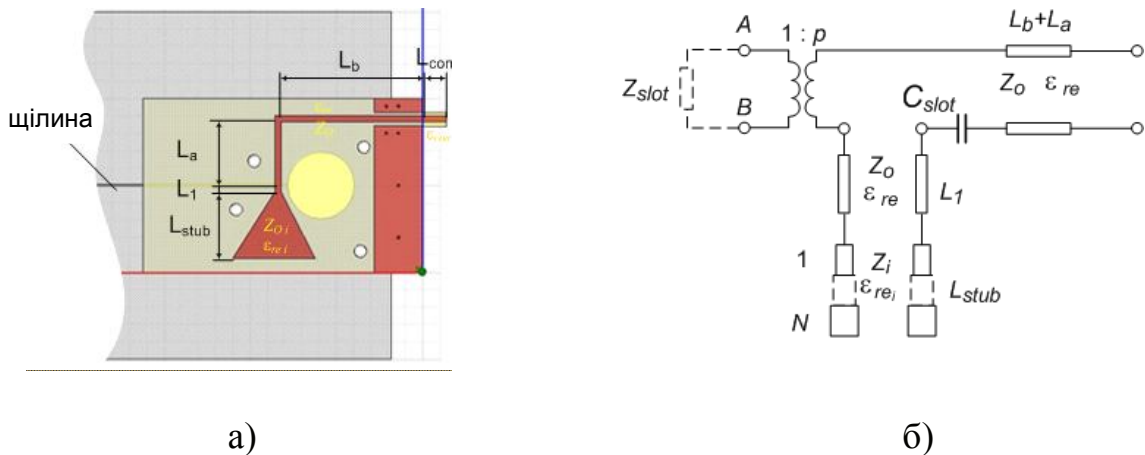


Рис. 2. Мікросмужковий фідер для антенного елемента Вівальді:
а) схематичне зображення, б) еквівалентна схема

В якості цільової функції була обрана різниця між вимірним і промодельованим коефіцієнтом відображення S_{11} . Знайдена оптимальна величина коефіцієнта трансформації для розглянутої системи дорівнює $p = 0,97$. В результаті виконаної оптимізації також була знайдена ефективна ширина щілини антенного елемента Вівальді, яка виявилася менше фізичного розміру за рахунок впливу діелектричної підкладки МСФ. Отримане значення ширини щілини використовувалося для електромагнітного моделювання решітки, знайдене значення коефіцієнта трансформації використовувалося як відомий параметр моделі МСФ.

Розроблено алгоритм моделювання антенної системи з фокальною решіткою. Моделювання проводиться в два етапи. На першому етапі розраховуються вихідні хвилі ϵ_{prim} з антеною решітки з МСФ і МШП (без

рефлектора) при падінні на неї плоских хвиль з усіх напрямків (рис. 3).

На рисунку використані наступні позначення: E_i^{CO} і E_i^{XP} — відповідно ко- і кросполяризована падаюча з заданого напрямку хвиля із заданою напруженістю поля, e_{ant}^{CO} і e_{ant}^{XP} — вектори вихідного сигналу на портах металеві структури решітки, відповідні до падаючої хвилі; e_{prim}^{CO} і e_{prim}^{XP} — сигнальний вектор з урахуванням МСФ та МШП.

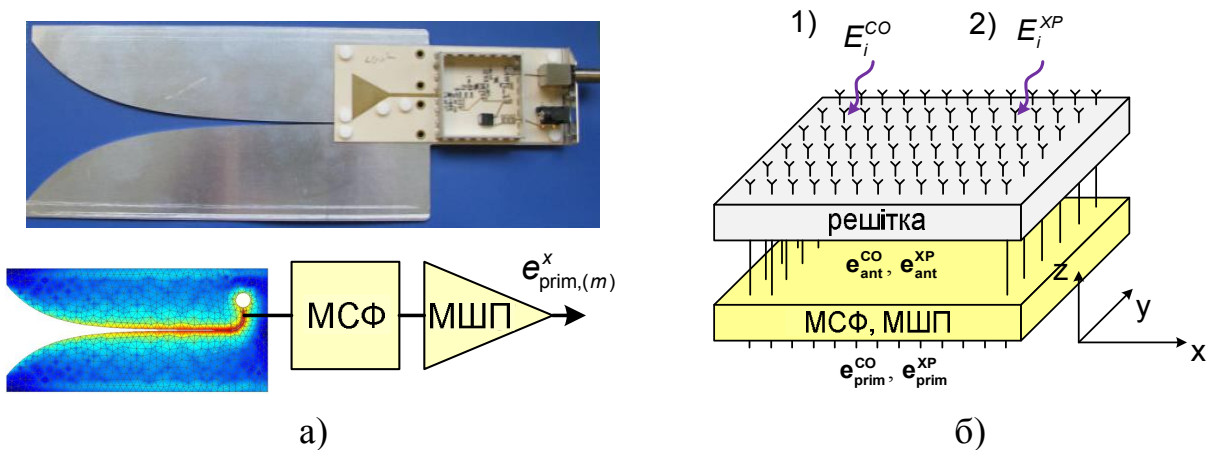


Рис. 3. Система без рефлектора і її частини:

а) один антенний елемент системи, б) схема системи, що включає антенну решітку з окремих антенних елементів

Сигнальний вектор e_{ant}^x на виході решітки без МСФ і МШП розраховується як

$$e_{ant}^x = \mathbf{L} \mathbf{V}_{oc}^x, \quad (1)$$

де $\mathbf{L} = \sqrt{Z_0} \mathbf{I} \cdot (\mathbf{Z}_{ant} + Z_0 \mathbf{I})^{-1}$ — матриця перетворення напруг на виході відкритих (без навантаження) елементів решітки у вихідний сигнальний вектор, який являє собою вихідну хвилю; \mathbf{Z}_{ant} — матриця опорів антенної решітки без МСФ; \mathbf{I} — одинична матриця; Z_0 — хвильовий опір фідерів. Елементи вектора напружень $V_{oc}^x(\theta, \varphi)$ на виходах металеві структури решітки (без МСФ) без навантаження розраховуються за формулою $V_{oc,(m)}^x(\theta, \varphi) = \frac{1}{j\omega\mu} (E_i g_m^x(\theta, \varphi))$, де $g_m(\theta, \varphi)$ — ДС антенних елементів; E_i — напруженість електричного поля падаючої хвилі; j — уявна одиниця; ω — циклічна частота; μ — магнітна проникність вільного простору; $m = 1 \dots M$, M — кількість елементів у решітці; верхній індекс x позначає компоненту вздовж осі X .

Щоб отримати сигнальний вектор на виході решітки з МСФ і МШП, решітка подається як M -полюсник з відомою матрицею розсіяння S і відомою вихідною сигнальною хвилею (1). До портів цього M -полюсника підключається МСФ, до виходу якого, у свою чергу, підключається МШП. У результаті виходить мікрохвильова модель, показана на рис. 4а.

Сигнальний вектор на виході такої системи розраховується чисельно в мікрохвильовому симуляторі *CAESAR*.

На другому етапі моделювання в систему, показану на рис. 4а, додається рефлектор (рис. 4б). Таким чином, спочатку розраховуються вторинні ДС елементів решітки (після відбиття від дзеркального рефлектора), і далі використовуються для розрахунку \mathbf{e}_{ant} . На відміну від першого етапу моделювання, на даному етапі не потрібно знати ДС елементів решітки для всіх напрямів, що значно скорочує час обчислень.

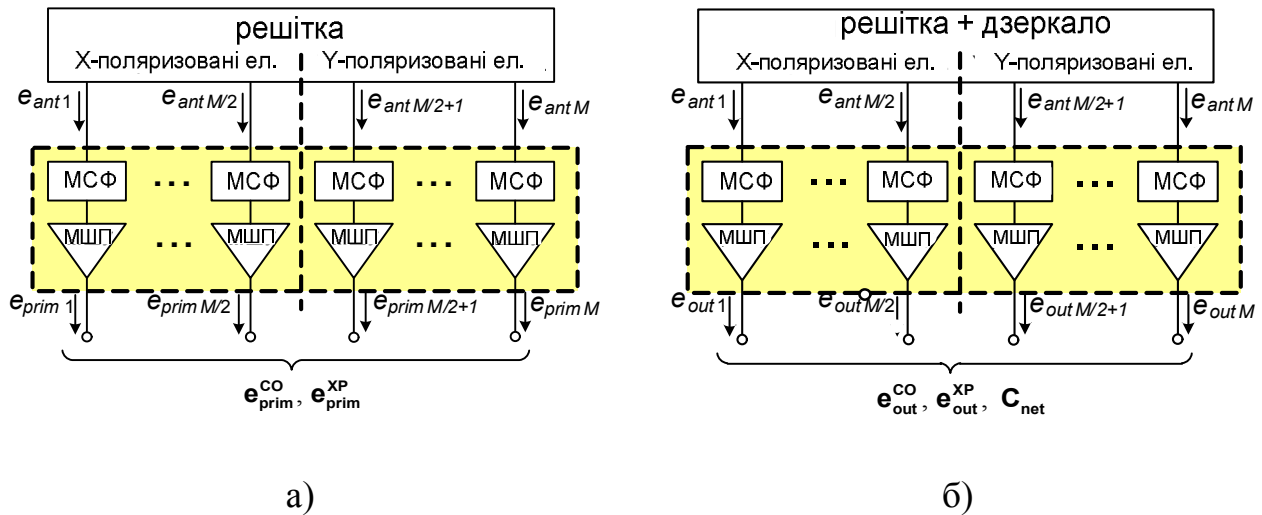


Рис. 4. Мікрохвильова модель системи: а) без рефлектора, б) з рефлектором

Крім сигнального вектора \mathbf{e}_{out} , на даному етапі в мікрохвильовому симуляторі розраховується шумова кореляційна матриця \mathbf{C}_{net} між виходами елементів антенної решітки з МСФ і МШП. Вихідними даними для цього є шумова кореляційна матриця \mathbf{C}_{ant} системи без МСФ і МШП:

$$\mathbf{C}_{ant} = \frac{1}{2} \mathbf{L} \mathbf{V}_{corr} \mathbf{L}^H, \quad (2)$$

де \mathbf{V}_{corr} — кореляційна матриця шумової напруги на портах металеві структури решітки, елементи якої є коефіцієнтами кореляції між напругою на портах відповідної пари елементів решітки при прийомі тільки шумів оточення:

$$\mathbf{V}_{\text{corr}} = \overline{\mathbf{V}_{\text{oc}} \mathbf{V}_{\text{oc}}^H} = \begin{pmatrix} \overline{|V_{oc,1}|^2} & \overline{V_{oc,1} V_{oc,2}^*} & \cdots & \overline{V_{oc,1} V_{oc,M}^*} \\ \overline{V_{oc,2} V_{oc,1}^*} & \overline{|V_{oc,2}|^2} & \cdots & \overline{V_{oc,2} V_{oc,M}^*} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{V_{oc,M} V_{oc,1}^*} & \overline{V_{oc,M} V_{oc,2}^*} & \cdots & \overline{|V_{oc,M}|^2} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де оператор $\overline{\dots}^H$ — ермітовий оператор; \dots^* — оператор комплексного сполучення; \dots — оператор усереднення за часом.

Вибрана конфігурація променів, розроблено методику розрахунку оптимальних за кількома критеріями (максимальна прийнята потужність, максимальна чутливість, максимальна чутливість з обмеженнями за напрямками) вагових коефіцієнтів для антенної решітки та дано вирази для розрахунків основних її характеристик. Зокрема, для кожного з формованих променів (для кожного набору вагових коефіцієнтів) отримані вирази для розрахунку:

- комплексних ДС променів системи з урахуванням МСФ;
- вихідного сигналу системи для вагових коефіцієнтів, розрахованих для прийому со- і хр-компонент падаючого поля (це необхідно для аналізу поляризаційних властивостей системи);
- залежності чутливості системи від напрямку;
- коефіцієнтів ефективності системи (коефіцієнт використання поверхні; ККД системи; η_{tap} — коефіцієнт, що враховує нерівномірність амплітудного розподілу поля в апертурі; η_{sp} — коефіцієнт перехоплення; η_{ph} — коефіцієнт, що враховує відхилення фазового розподілу поля в апертурі від заданого);
- шумової температури системи T_{sys} , а також її складових: T_{sp} — шумова температура за рахунок переливання енергії опромінювача за краї дзеркала, T_{sec} — приведена до входу шумова температура всіх наступних за МШП ланцюгів, T_{LNA} - еквівалентна шумова температура, створювана МШП;

Чутливість системи S як функцію напрямку та вагових коефіцієнтів \mathbf{w} при формуванні n -го променя можна записати як

$$S(\theta, \phi, \mathbf{w}) = \frac{A_{\text{eff},n}(\theta, \phi, \mathbf{w})}{T_{\text{sys},n}(\mathbf{w})}, \quad (4)$$

де $A_{\text{eff},n}(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_n(\theta, \phi)$ — ефективна площа антени; $D_n(\theta, \phi)$ — коефіцієнт спрямованої дії антени, розрахований на другому етапі моделювання; $T_{\text{sys},n}(\mathbf{w})$ — шумова температура системи; λ — довжина хвилі.

ККД антени визначався через віднесення розсіяної потужності до

потужності, прийнятої при збудженні структури. Розсіяна потужність розраховувалася за відомим розподілом струмів по поверхні металу і поверхневому опору останнього.

Третій розділ присвячений чисельному моделюванню та експериментальній перевірці параметрів антенної решітки. У цьому розділі наведені чисельні результати моделювання антенної решітки поза дзеркальним рефлектором і зроблена їх експериментальна перевірка з метою підтвердження адекватності розробленої моделі.

Показано, що при незначному (близько 10%) відхиленні коефіцієнта трансформації p в моделі від його оптимальної величини спостерігається значна зміна коефіцієнта відбиття: відбувається не тільки збільшення помилки аргументу і зміна значення модуля, але і зсув і згладжування максимумів частотної залежності. Для розглянутої антенної решітки помилка між модельованим та вимірним значеннями модуля S_{11} досягає 60% в діапазоні частот (0,7 ... 1,7) ГГц при зміні p на 10%, в той час як для оптимальної величини p помилка не перевищує 20%. На рис. 5 показаний вимірний і промодельований для різних p модуль коефіцієнта відбиття від одного з елементів Вівальді трьохелементної решітки.

Було запропоновано поліпшення конструкції антенної решітки, що призвело до поліпшення стабільності електричних характеристик решітки, а також зменшенню шумової температури. Середньоквадратичне відхилення коефіцієнта відбиття для крайових елементів решітки було зменшено з (7 ... 20)% до (3 ... 7)% у діапазоні частот (0,8 ... 1,8) ГГц. Шумова температура МСФ була зменшена на 5 К за рахунок виключення з'єднувача МСФ і МШП, а також за рахунок укорочення довжини мікросмужка МСФ.

Промодельована і виміряна повна матриця розсіяння антенної решітки з 7×8 елементів (2 поляризації по 56 елементів) і показано гарна відповідність між результатами моделювання та вимірювань, що підтверджує адекватність моделі.

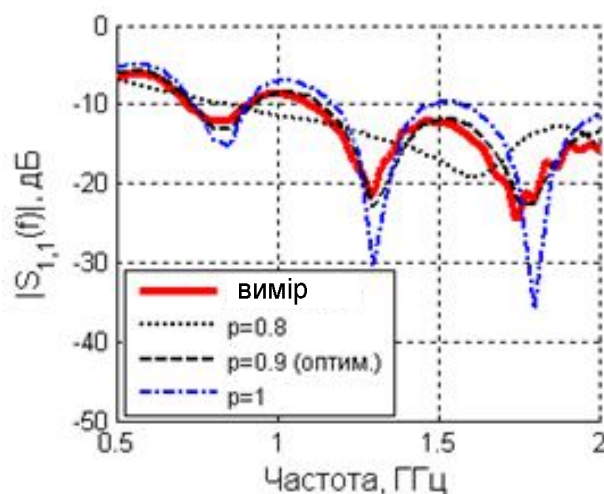


Рис. 5. Модуль коефіцієнта відбиття від одного з елементів Вівальді

трьохелементної решітки

Помилка між вимірними і отриманими в результаті моделювання значеннями модуля коефіцієнта передачі від центрального елемента решітки до інших елементів не перевищує 1 дБ. Помилка в аргументі цих коефіцієнтів не перевищує 15° (рис. 6).

Показано значну відмінність між ДС центральних і крайових елементів решітки (різниця досягає 5 дБ в діапазоні кутів, що перекриваються дзеркалом), тому не можна застосовувати методи нескінченних решіток для електромагнітного моделювання антенної решітки.

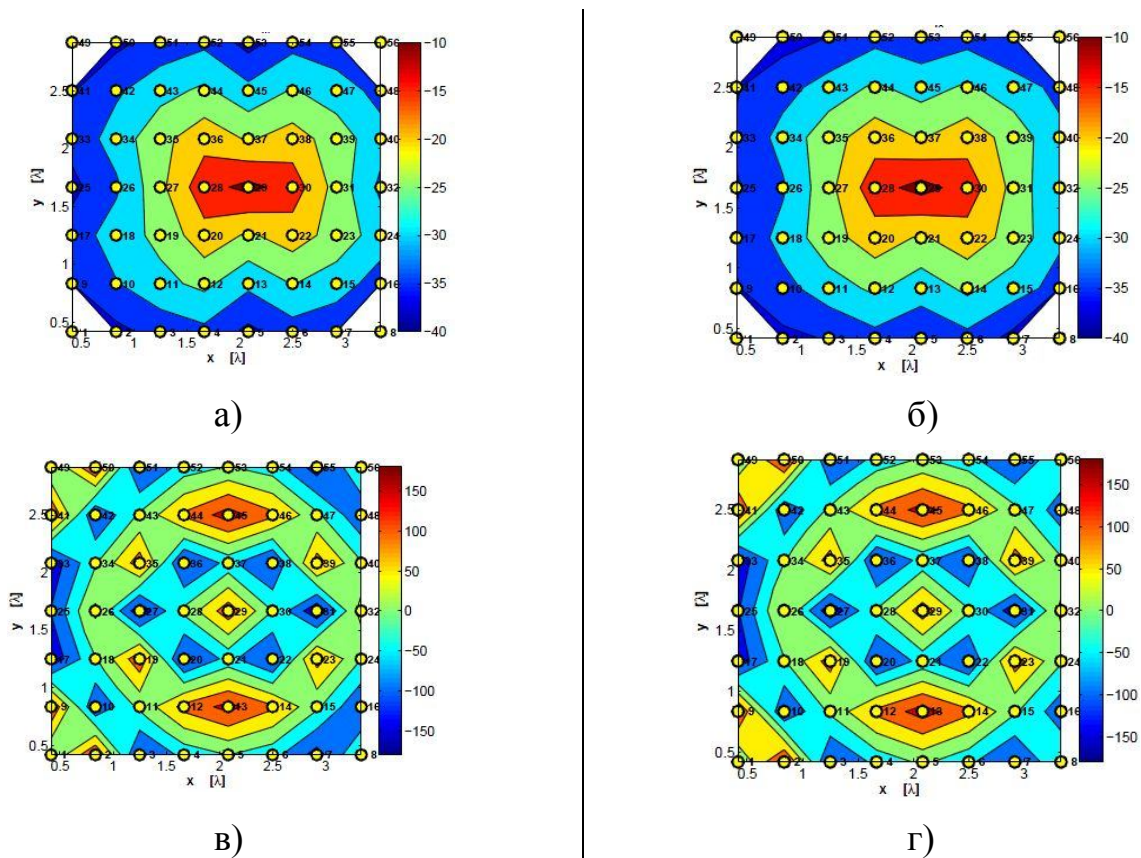


Рис. 6. Коефіцієнти зв'язку $S_{29,m}$ елемента № 29 з іншими кополяризованими елементами решітки на частоті 1 ГГц: а) вимірні $|S_{29,m}|$, дБ; б) модельовані $|S_{29,m}|$, дБ; в) вимірні аргументи $S_{29,m}$, градуси; г) модельовані аргументи $S_{29,m}$, градуси

Експериментально визначені вагові коефіцієнти, оптимальні за критерієм максимальної чутливості. Розрахована величина зміщення решітки на відстань Δz відносно точки фокусу дзеркала, при якому фазовий розподіл в апертурі дзеркального рефлектора стає найбільш рівномірним. Хороший збіг отриманого значення ($\Delta z = 18,1$ см) з експериментально отриманою величиною ($\Delta z = 19$ см) також підтверджує адекватність моделі.

У четвертому розділі дисертаційної роботи виконано моделювання та

оптимізація основних параметрів антеною системи *APERTIF* та проведено їх вимір. При цьому використовувалися метод узгодження по полю (*CFM* – *Conjugate Field Matching*), метод максимізації чутливості без обмеження за напрямками (*MaxSNR* – *Maximum Signal-to-Noise Ratio*) і метод максимізації чутливості з обмеженнями за напрямками (*LCMV* – *linear constrained minimum variance*).

Проведена оптимізація параметра g_{const} , задаючого необхідний рівень ДС формованого променя в напрямку обмежень, методом *LCMV* формування променів на декількох частотах. В якості критерію оптимізації було обрано: нерівномірність чутливості в багатопроменевому полі огляду повинна бути мінімальною, при цьому максимальна чутливість в багатопроменевому полі огляду при формуванні променів методом *LCMV* не повинна зменшитися більш, ніж на 10%, в порівнянні з методом *MaxSNR*. На рис. 7 показана цільова функція (нерівномірність чутливості), а також діапазон зміни нормованої чутливості як функції від параметра g_{const} , що оптимізується.

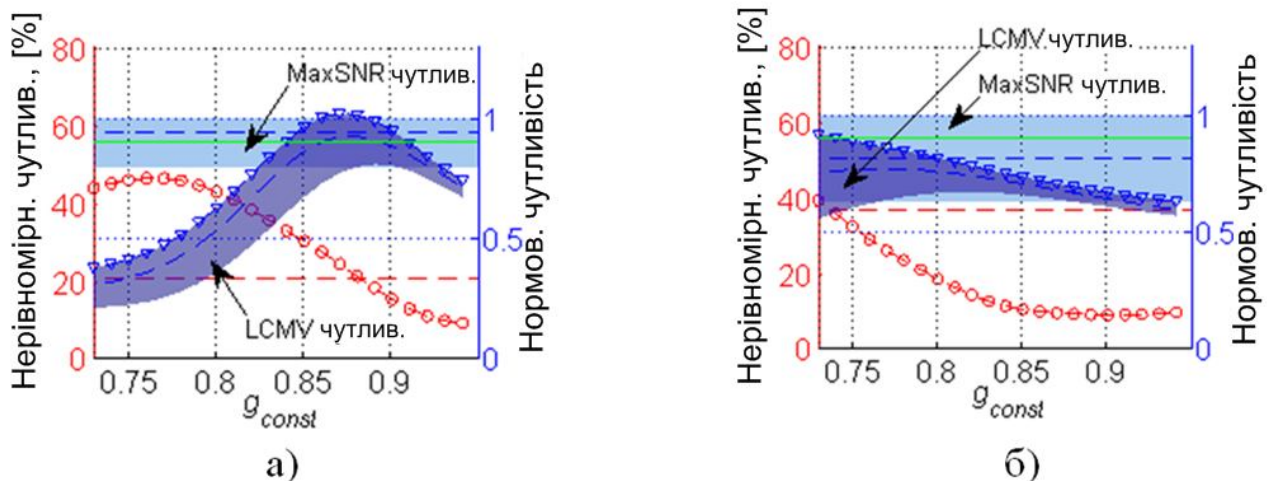


Рис. 7. Нормована чутливість і її нерівномірність в межах поля огляду (цільова функція): а) для частоти 1 ГГц; б) для частоти 1,6 ГГц

Показано, що найбільший вигравш у рівномірності чутливості ΔS метод *LCMV* дає на нижній частоті робочого діапазону (нерівномірність дорівнює 21% для методу *MaxSNR* і 12% для методу *LCMV* на частоті 1 ГГц). Також можна відзначити зменшення оптимального рівня посилення променя в напрямку обмеження по відношенню до посилення в напрямку максимуму з ростом частоти. Це можна пояснити тим, що ширина променів зменшується з підвищенням частоти, і, отже, в заданих напрямках обмежень, які для всіх частот однакові, рівень посилення падає.

Розраховані основні параметри дзеркальної антенної системи з фокальною решіткою *APERTIF*:

- вагові коефіцієнти для елементів решітки;
- первинні та вторинні ДС для деяких променів;

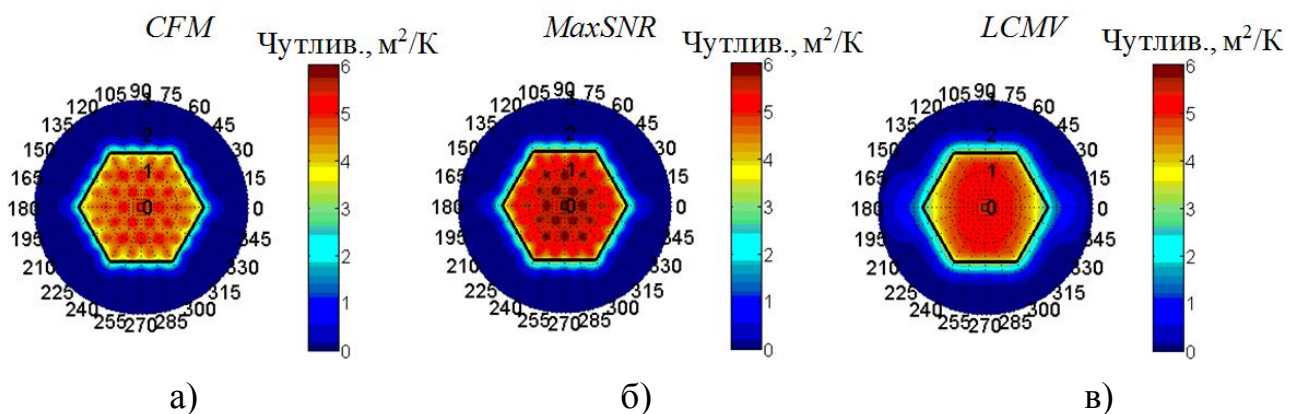
- коефіцієнти ефективності системи (коефіцієнт використання поверхні, коефіцієнт перехоплення, коефіцієнти амплітудного та фазового розподілів в апертурі дзеркала);
- шумова температура та її складові;
- коефіцієнт спрямованої дії системи (КСД) системи;
- чутливість системи для декількох променів у полі огляду.

На рис. 8а,б,в показана розрахована чутливість приймальної антенної системи в усьому полі огляду (37 одночасно формованих променів) для трьох критеріїв оптимізації вагових коефіцієнтів. Товстою лінією позначена межа поля огляду. Перетини чутливостей променів площиною наведено на рис. 8г,д,е. Штриховий лінією показана чутливість окремих променів, скануючих від $-1,5^\circ$ до $1,5^\circ$, суцільною лінією показана загальна чутливість, отримана після обробки у кореляторі сигналів від всіх променів.

Всі перераховані параметри наведені у порівнянні для трьох схем формування променів.

Використовуючи розроблену модель, проведено моделювання системи *APERITIF* при трьох схемах формування променів. Показано, що:

- схема *CFM* не дає максимальної чутливості системі, хоча КСД при ній максимальний і має істотну нерівномірність у полі огляду (34% на частоті 1,42 ГГц), тому доцільно застосовувати інші схеми формування променів;
- схема *LCMV* дозволяє досягти компромісу між чутливістю системи та її нерівномірністю всередині поля огляду; для розглянутої системи зменшення чутливості на 10% дозволило зменшити її нерівномірність у полі огляду з 34% до 24% на частоті 1,42 ГГц і з 22% до 5% на частоті 1 ГГц.
- при використанні схеми *LCMV* чутливість швидко падає при збільшенні кута сканування через спотворення форми променя; якщо для *MaxSNR* критерію віднесення чутливості центрального променя до чутливості крайового променя дорівнює приблизно 1,3, то для критерію *LCMV* це відношення дорівнює 1,7.



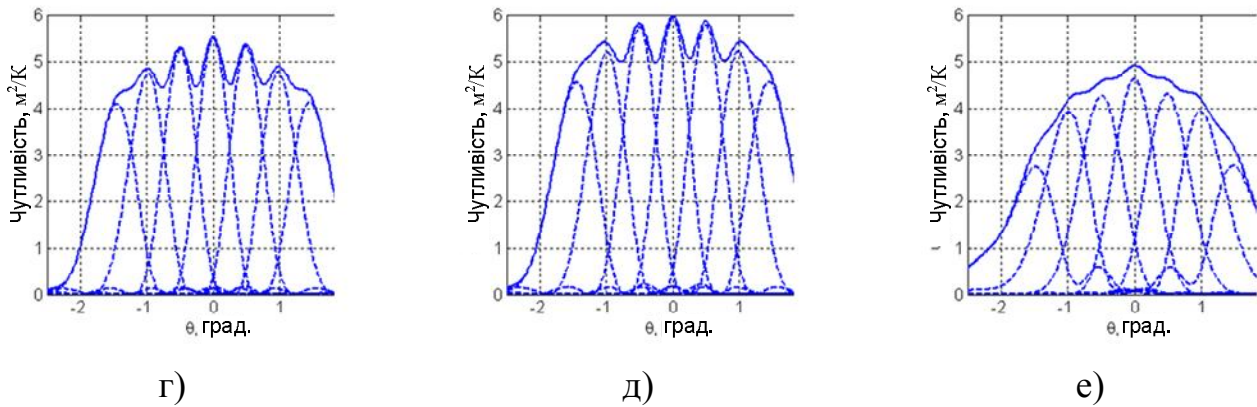


Рис. 8. Чутливість у полі огляду антенної системи для трьох схем формування променів

Для другого дослідного зразка *APERTIF* проведені вимірювання чутливості п'яти променів у перерізі $\varphi = 0^\circ$ і результати порівняні з промодельованими значеннями чутливості. Різниця не перевищує 4% для центрального променя і 10% для крайового променя (рис. 9).

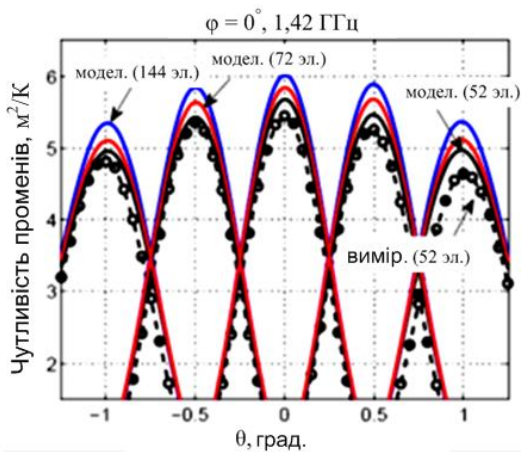


Рис. 9. Перетини променів 16 ... 19, результати моделювання та вимірювання

У результаті проведення дослідження системи як поляриметра, встановлено, що при формуванні променів заданої поляризації усіма елементами решітки (як X-, так і Y-орієнтованими), середня в полі огляду величина коефіцієнта ортогональності променів покращується з -25 дБ до -33 дБ. Однак при цьому зростає обсяг обчислень (оскільки при формуванні використовується в 2 рази більше елементів решітки), і потрібні великі обчислювальні потужності.

ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень у дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача моделювання та оптимізації гібридних антенних систем для радіотелескопів з широким (багатопробним) полем огляду завдяки використанню єдиного підходу до теоретичного аналізу окремих елементів системи та використання запропонованого критерію рівномірної чутливості, що дозволяє розраховувати основні характеристики та параметри системи.

При цьому отримані наукові результати:

1. Розроблено математичну та комп'ютерну моделі системи прийому

сигналу і керування променями гібридної антенної системи, яка складається з параболічного рефлектора, багатоелементної щільної антенної решітки, мікросмужкового фідера і малошумливих підсилювачів. Модель дозволяє розраховувати найважливіші параметри радіотелескопів, такі як: а) оптимальні за обраним критерієм вагові коефіцієнти для елементів фокальній решітки, б) шумова температура системи та її складові (за рахунок прийому шумів землі, втрати через неузгодженості елементів решітки з МШП і взаємні зв'язки між елементами решітки), в) коефіцієнт використання поверхні і його складові (ефективність амплітудного і фазового розподілу поля в апертурі дзеркала, коефіцієнт перехоплення); г) ефективність поляризаційної дискримінації.

2. Запропоновано критерій оптимізації параметра для методу розрахунку вагових коефіцієнтів *LCMV* для досягнення рівномірної чутливості в багатопробному полі огляду при незначному її зменшенні. Показаний виграв у рівномірності чутливості антенної системи у полі огляду при використанні методу формування променів *LCMV* за рахунок незначного зниження рівня чутливості (до 10%). Вперше розроблено алгоритм оптимізації параметрів антенної системи з фокальною решіткою за умовою цих критеріїв.

3. Вперше розраховані значення оптимальних вагових коефіцієнтів антенної решітки, що дозволяють отримати задану величину рівномірності чутливості в багатопробному полі огляду телескопа.

4. Удосконалено математичну модель мікросмужкового фідера для антенних елементів Вівальді, яка відрізняється від відомої моделі Кнорра урахуванням ємності щілини. Вперше знайдено оптимальне значення коефіцієнта трансформації для цієї моделі, що дозволило отримати мінімальне значення коефіцієнта відображення та розрахувати ефективну ширину щілини антенного елемента Вівальді.

5. Створене прикладне програмне забезпечення, що дозволяє аналізувати гібридні дзеркальні антени з фокальною решіткою і прийнятною частиною, що використовує розроблену модель.

6. Результати для розробленої моделі системи перевірені експериментально як для окремих елементів системи (антенний елемент Вівальді та його пристрій живлення) та малоелементні решітки, так і для всієї системи в цілому (виміри виконані в інституті *ASTRON* на одній з антен Вестерборгського радіотелескопу). У результаті експериментальних досліджень підтверджена достовірність запропонованих математичних моделей.

7. Розраховано параметри системи радіотелескопу *APERTIF*, дано рекомендації щодо поліпшення характеристик її антенної решітки.

8. Результати теоретичних і експериментальних досліджень у вигляді розрахункових методик були впроваджені у Нідерландському інституті радіоастрономії *ASTRON* у проєкті *APERTIF*, а також у Севастопольському конструкторському бюро радіозв'язку ТОВ «Телекарт-прибор».

Результати досліджень рекомендуються для впровадження на підприємствах і в організаціях, що займаються розробкою, виробництвом та

експлуатацією антенних систем для радіотелескопів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Юпиков О.А. Модель устройства питания антенны Вивальди / О.А. Юпиков // Вестник СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 101. — С. 125-128.
2. Analysis of large microstrip-fed tapered slot antenna arrays by combining electrodynamic and quasi-static field models / R. Maaskant, M. V. Ivashina, O. A. Iupikov, and other // IEEE Trans. Antennas and Propagat. — 2011. — Vol. 59, issue 6. — P. 1-10.
3. An Optimal Beamforming Strategy for Wide-Field Surveys With Phased-Array-Fed Reflector Antennas / M. V. Ivashina, O. Iupikov, R. Maaskant, and other // IEEE Trans. Antennas and Propagat. — 2011. — Vol. 59, issue 6. — P. 1-12.
4. Юпиков О.А. Влияние числа приемных каналов в антенной системе с фокальной решеткой на ее чувствительность / О.А. Юпиков // Электроника и связь: сб. науч. тр. — 2011. — Вып. 5 (64). — С. 75-81.
5. Юпиков О.А. Определение чувствительности многолучевой антенной системы с фокальной решеткой / О.А. Юпиков, М.В. Ивашина // Сб. науч. праць академії військово-морських сил імені П.С.Нахімова. — 2010. — Вип.1 (1). — С. 74-79.
6. Iupikov O.A. Feed model for the Tapered slot antennas / O.A. Iupikov // Proc. 4th Int. Conf. [UWBUSIS 2008], (Sevastopol, 15-19 September 2008). — 2008. — P. 89-91.
7. Юпиков О.А. Строгий электродинамический подход к моделированию больших конечных антенных решеток и первые экспериментальные результаты прототипа системы для вестерборгского радиотелескопа / О.А. Юпиков, Роб Маасконт // матеріали 3-ої міжн. конф. [«Проблеми телекомунікацій ПТ-2009»], (Київ, 21–24 квітня 2009) / М-во освіти і науки України — Київський політехнічний інститут — Київ: КПІ, 2009.
8. Юпиков О.А. Влияние допуска при изготовлении антенных решеток из щелевых антенн типа Вивальди на импеданс решетки / О.А. Юпиков // матеріали 5-ої молодіжн. конф. [«Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2009»], (Севастополь, 20-25 квітня 2009) / М-во освіти і науки України — Севастопольський національний технічний університет – Севастополь: СевНТУ, 2009. — С. 165.
9. Юпиков О.А. Электродинамическая модель антенной решетки из элементов Вивальди и ее импеданс. Экспериментальная верификация результатов моделирования / О.А. Юпиков, В.Ю. Еремкин // матеріали 13-го міжн. форуму [«Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»], (Харків, 23–25 квітня 2009) / М-во освіти і науки України – Харківський національний університет радіоелектроніки — Харків: ХГТУРЭ, 2009. — Ч.1.

10. Ivashina M.V. Off-Axis Beam Performance of focal Plane Arrays for the Westerbork Synthesis Radio Telescope – Initial Results of a Prototype System / M.V. Ivashina, O.A. Iupikov, R. Maaskant et al. // Proc. of the Int. Symp. On Antennas and Propag. [APSURSI '09], (Charleston, SC, USA, 1–5 June 2009) . — 2009. — P. 1-4.

11. Arts M. Design of a Low-Loss Low-Noise Tapered Slot Phased Array Feed for Reflector Antennas / M. Arts, M.V. Ivashina, O.A. Iupikov et al. // Proc. of the 4th Europ. Conf. On Antennas and Propag. [EuCAP'2010], (Barcelona, Spain, 12-16 April 2010) . — 2010. — P. 1-5.

12. Ivashina M.V. Extending the Capabilities of the GRASP and CAESAR Software to Analyze and Optimize Active Beamforming Array Feeds for Reflector Systems / M.V. Ivashina, O.A. Iupikov, W. van Cappellen // Proc. of the Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications [ICEAA '2010], (Sydney, Australia, 20-24 September 2010) . — 2010. — P. 197-200.

13. Iupikov O.A. Reducing the complexity of the beam calibration models of phased-array radio telescopes / O.A. Iupikov, M.V. Ivashina, O.M. Smirnov // Proc. of the 5th Europ. Conf. On Antennas and Propag. [EuCAP'2011], (Rome, Italy, 10-15 April 2011) . — 2011. — P. 1-4.

АНОТАЦІЯ

Юпіков О.О. Розробка моделі та оптимізація параметрів гібридної антенної системи для радіотелескопів з широким полем огляду. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 — антени та пристрої мікрохвильової техніки. — Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2013.

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень у дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача моделювання та оптимізації гібридних антенних систем для радіотелескопів з широким (багатопроблемним) полем огляду завдяки використанню єдиного підходу до теоретичного аналізу окремих елементів системи та використання запропонованого критерію рівномірної чутливості.

Розроблена єдина модель гібридної прийомної антенної системи з фокальною решіткою і приймальною частиною, що дозволяє розраховувати найважливіші параметри антенних систем радіотелескопів, такі як: а) оптимальні за довільним критерієм вагові коефіцієнти для елементів фокальної решітки, б) шумова температура системи та її складові в) коефіцієнт використання поверхні і його складові; г) ефективність поляризаційної дискримінації.

Ключові слова: гібридні рефлекторні антени, аналіз на рівні системи, фокальні решітки, радіотелескопи, максимальна чутливість.

АННОТАЦИЯ

Юпиков О.А. Разработка модели и оптимизация параметров гибридной антенной системы для радиотелескопов с широким полем обзора. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 — антенны и устройства микроволновой техники. — Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2013.

В результате теоретических и экспериментальных исследований в диссертации решена актуальная научно-прикладная задача моделирования и оптимизации гибридных антенных систем для радиотелескопов с широким (многолучевым) полем обзора благодаря использованию единого подхода к теоретическому анализу отдельных элементов системы и использования предложенного критерия равномерной чувствительности, что позволяет рассчитывать основные характеристики и параметры системы.

Разработана единая модель гибридной приемной антенной системы с фокальной решеткой и приемной частью, позволяющая рассчитывать важнейшие параметры радиотелескопов, такие как: а) оптимальные по выбранному критерию весовые коэффициенты для элементов фокальной решетки; б) шумовая температура системы и ее составляющие (за счет приема шумов земли, потери из-за рассогласования элементов решетки с малошумящими усилителями и взаимной связи между элементами решетки); в) КИП и его составляющие; г) эффективность поляризационной дискриминации.

Предложен критерий оптимизации весовых коэффициентов для достижения равномерной чувствительности в многолучевом поле обзора при незначительном ее уменьшении.

Впервые рассчитаны значения оптимальных весовых коэффициентов антенной решетки, позволяющие получить заданную величину равномерности чувствительности в многолучевом поле обзора телескопа.

Усовершенствована математическая модель микрополоскового фидера для антенных элементов Вивальди, отличающаяся от известной модели Кнорра учетом емкости щели. Впервые найдено оптимальное значение коэффициента трансформации для этой модели, что позволило получить минимальное значение коэффициента отражения и рассчитать эффективную ширину щели антенного элемента Вивальди.

Результаты проверены экспериментально как для отдельных элементов системы (антенный элемент Вивальди и его устройство питания) и небольшой решетки, так и для всей системы в целом (измерения выполнены в институте *ASTRON* на одной из антенн Вестерборгского радиотелескопа).

Ключевые слова: гибридные рефлекторные антенны, анализ на уровне системы, фокальные решетки, радиотелескопы, максимальная чувствительность.

ABSTRACT

Iupikov O.A. Modeling and optimization of the hybrid antenna system for radio telescopes with a wide field of view. — The Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Science by speciality 05.12.07 — antennas and microwave devices. — Kharkov National Radio Electronic University, Kharkov, 2013.

Candidate science degree thesis by speciality 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkov national university of radio electronics, Kharkov, 2013.

As the result of theoretical and experimental studies in the dissertation is solved an actual scientific and applied problem of modeling and optimization of the hybrid antenna systems for radio telescopes with a wide (multi-path) field of view through the use of unified approach of the system components and use of the proposed criterion of uniform sensitivity. The model of the hybrid system with the receiving antenna system with the focal array and the receiving part allows to calculate the most important parameters of radio telescopes, such as: a) optimal by an selected criterion weights for the elements of the focal array; b) noise temperature of the system and its components (due to noise by accepting the ground noise, loss due to the mismatch of array elements with low noise amplifiers and interconnection between the elements of the array); c) the TRC and its components; d) the effectiveness of polarization discrimination is developed.

Keywords: hybrid reflector antenna, system analysis, focal grid, radio telescopes, maximum sensitivity.

Підп. до друку 4.05.13
Умов. друк. арк. 1,2
Зам. № 2-1024

Формат 60x84 ¹/₁₆
Тираж 120 прим.
Ціна договірна.

Спосіб друку — ризографія

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано у навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.
Харків, просп. Леніна, 14