

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ВИШНЯКОВА Юлія Валентинівна

УДК 621.396.677.3

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ
БАГАТОВХОДОВИХ РЕКОНФІГУРОВАНИХ
АНТЕННИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико–математичних наук, професор
Лучанінов Анатолій Іванович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки Міністерства освіти і
науки України, професор кафедри основ
радіотехніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико–математичних наук, професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет імені
В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки
України, завідувач кафедри прикладної
електродинаміки;

доктор технічних наук, професор
Сухаревський Олег Ілліч,
науковий центр Повітряних Сил Харківського
університету Повітряних Сил імені Івана
Кожедуба Міністерства оборони України,
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться «___» _____ 2014 р. о ___ 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 в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «___» вересня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д–р техн. наук, професор



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальних задач теорії та техніки реконфігурованих антенних систем.

Реконфігуровані антени (РА) знайшли широке застосування в різноманітних радіотехнічних пристроях та системах, у тому числі в складі багатовходових систем, таких як МІМО (multiple–input multiple–output).

Основною перевагою РА порівняно з традиційними антенами є можливість реалізації декількох режимів роботи за рахунок зміни електричної конфігурації одного пристрою, тобто багатофункціональність.

На практиці реконфігурація реалізується шляхом введення до складу випромінюючої структури, до складу кіл узгодження та живлення різних керуючих елементів (КЕ), таких як MEMS перемикачі, напівпровідникові елементи (PIN діоди, варикапи) та ін., з можливістю дискретної або безперервної зміни їх параметрів.

Використання реконфігурованих антен у складі МІМО систем дозволяє збільшити кількість ступенів свободи під час оптимізації характеристик таких систем, домогтися покращення характеристик системи за рахунок керування як параметрами та характеристиками РА, так і розташуванням випромінювачів у складі антенної системи.

Однак, у даний час відсутня модель, що враховує наявність у структурі антени аналогових та дискретних керуючих елементів, які можуть мати нелінійні характеристики. Крім того, невирішеною на даний момент є й задача вибору оптимальної геометрії випромінюючої системи РА у відповідності до заданих вимог до її робочих характеристик. Це призводить до необхідності проведення наукових досліджень з метою подальшого розвитку методів аналізу та оптимізації реконфігурованих антен та систем з РА, створення алгоритмів та програмного забезпечення для вирішення подібних задач.

Для побудови коректної моделі МІМО системи, у складі якої є реконфігуровані антени, виникла необхідність поєднання теорії антен з теорією інформації та обробки сигналів. Саме такий підхід дозволяє врахувати як особливості функціонування багатовходових систем, так і реальні електродинамічні ефекти (такі як взаємні зв'язки між антенами, нелінійність характеристик КЕ), що істотно впливають на вихідні характеристики системи передачі інформації, а також дозволяє виявити додаткові механізми для керування параметрами та характеристиками системи.

У зв'язку з цим є актуальною тема дисертації, спрямованої на розвиток методів аналізу та оптимізації багатовходових реконфігурованих антенних систем, у складі яких присутні елементи та пристрої як з лінійними, так і з нелінійними характеристиками; на розробку коректної математичної моделі таких систем та числову реалізацію цієї моделі, а також її застосування для дослідження характеристик таких систем.

У дисертації вирішена актуальна науково–прикладна задача розвитку методів аналізу та оптимізації багатовходових систем з реконфігурованими антенами на основі комплексного підходу з використанням методів

електродинаміки та схемотехніки, що дозволило врахувати нелінійні ефекти, присутні у реальних багатовходових системах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Представлені в дисертації дослідження пов'язані з виконанням планових д/б НДР № 260–5 «Розробка методів моделювання інформаційних мереж, побудованих на основі реконфігурованих антен» (№ ДР 0111U002903) і № 270–1 (№ ДР 0112U000009), фінансованих і виконаних за тематичними планами Міністерства освіти і науки України, в проведенні яких автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є розвиток методів аналізу та оптимізації багатовходових систем, а також побудова коректної математичної моделі МІМО системи з реконфігурованими антенами на базі комплексного підходу з використанням методів електродинаміки та схемотехніки. Дослідження спрямовані на створення нових методик, моделей і алгоритмів, призначених для проектування, аналізу та оптимізації багатовходових систем з реконфігурованими антенами з урахуванням ефектів, що мають місце в реальних системах передачі інформації. Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних задач.

1. Проведення аналізу сучасних рішень у галузі багатовходових систем з реконфігурованими антенами та класифікація існуючих математичних моделей багатовходових систем.

2. Розробка математичної моделі багатовходової системи з РА, що враховує наявність в таких системах нелінійних ефектів і взаємних зв'язків між випромінювачами.

3. Розробка методики й алгоритму проектування МІМО системи з реконфігурованими антенами.

4. Розробка алгоритму та реалізація програми для оптимізації реконфігурованих антен, що враховують нелінійність характеристик керуючих елементів, як дискретних, так і аналогових.

5. Оцінка характеристик багатовходових систем з реконфігурованими антенами за допомогою розроблених моделей та алгоритмів, з метою виявлення нових ефектів і закономірностей, недоступних для аналізу моделями, які існували раніше.

Об'єкт дослідження – процес випромінювання та приймання електромагнітних хвиль у багатовходових системах пристроями зі змінюваною конфігурацією.

Предмет дослідження – моделі багатовходових радіотехнічних систем передачі інформації, у складі яких присутні реконфігуровані антени.

Методи дослідження. Було використано метод інтегральних рівнянь, математичні методи теорії антен з нелінійними елементами (НЕ), математичний апарат теорії НВЧ кіл та багатополісників, а також методи обчислювальної математики.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Запропоновано та обґрунтовано новий підхід до аналізу багатовходових систем з нелійними характеристиками, який, на відміну від

відомих, передбачає аналіз усієї системи в цілому. Вперше запропоновано розглядати всю багатовходову систему як антену з нелінійними елементами (АНЕ). Такий підхід, на відміну від відомих, має наступні особливості:

- гнучкість, тобто можливість використання моделей вузлів або пристроїв системи різного рівня складності – від макромоделей до моделей електродинамічного (ЕД) рівня; можливість зміни складу системи в залежності від особливостей її функціонування;

- універсальність, тобто можливість дослідження систем МІМО, як із суттєво віддаленими передавальними та приймальними вузлами, так і таких, що працюють в умовах найбільшої їхньої ефективності, тобто в умовах організації зв'язку всередині невеликих приміщень або обмеженої групи будівель (коли існує ймовірність розміщення приймального та передавального вузлів у ближній або проміжній зоні один одного).

2. Вперше розроблено математичну модель багатовходової системи з реконфігурованими антенами. Модель базується на запропонованому підході та, на відміну від відомих моделей МІМО систем, використовує поєднання електродинамічного та схемотехнічного підходів, що дозволяє аналізувати нелінійні ефекти, які виникають у таких системах, а також дозволяє дослідити взаємодію досліджуваної системи з іншими ЕД системами. Існуючі лінійні моделі МІМО систем можуть розглядатися як окремий випадок запропонованої моделі.

3. Розроблено нову методику й алгоритм проектування багатовходових реконфігурованих антенних систем. Запропоновані методика й алгоритм, на відміну від відомих, враховують наявність у структурі випромінювачів перемикаючих та керуючих елементів (ПЕ та КЕ) з лінійними або нелінійними характеристиками.

4. Показано, що підходи до аналізу лінійного МІМО каналу не можуть бути автоматично перенесені на випадок багатовходової системи з нелінійними елементами. Зокрема виявлено, що під дією зосередженої або інтермодуляційної завади на частоті, близькій до робочої частоти багатовходової системи, змінюється характер частотної залежності спектральної ефективності (СЕ) системи порівняно з лінійним випадком: поблизу робочої частоти спостерігається зменшення спектральної ефективності, а на границях смуги робочих частот СЕ зростає та прямує до СЕ лінійних систем.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропонована математична модель та реалізовані на її базі алгоритм та пакет програм можуть бути використані для розрахунку електродинамічних та інформаційних характеристик широкого класу багатовходових систем.

2. Розроблені методика, алгоритми та реалізований пакет програм WIRE_MIMO дають можливість більш повного аналізу та проектування багатовходових реконфігурованих антенних систем, за рахунок того, що дозволяють врахувати нелінійні ефекти, які виникають через наявність пристроїв з нелінійними характеристиками.

3. Розроблені методика проектування та пакет програм можуть бути використані для аналізу інших ЕД пристроїв з лінійними та нелінійними характеристиками, зокрема, ЕД пристроїв із нелінійними властивостями поверхневого імпедансу; проводових випромінюючих структур довільної конфігурації.

4. Розроблені в дисертації методика, алгоритми аналізу та модель багатовходових реконфігурованих антенних систем використовувались при виконанні д/б НДР № 260–5. Методика та результати розрахунків частотної залежності спектральної ефективності багатовходових систем з РА були використані при виконанні д/б НДР № 270–1. Матеріали дисертаційної роботи також впроваджено в учбовий процес кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки при підготовці та проведенні занять з дисципліни «Проектування пристроїв інформаційних мереж» та при підготовці курсу «Моделі каналів інформаційних мереж». Отримані в дисертації результати використовувались у дипломному проектуванні та при виконанні магістерських атестаційних робіт студентів спеціальностей «Радіотехніка» та «Системи технічного захисту інформації». Практичне значення отриманих результатів підтверджено актами про впровадження.

Достовірність отриманих результатів обумовлена коректним використанням математичного апарату теорії антен з нелінійними елементами і НВЧ кіл та методів обчислювальної математики, а також позитивними результатами порівняння ряду отриманих результатів із результатами інших авторів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, які знайшли відображення в пунктах наукової новизни та практичного значення, отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: розробка методики й алгоритму аналізу [1, 3–5, 9]; постановка та вирішення задачі, аналіз результатів [2, 7, 8]; постановка задачі, створення та програмна реалізація алгоритмів, аналіз отриманих результатів [11]; розробка математичної моделі системи, що враховує електродинамічні ефекти [12, 13]; постановка й аналітичне вирішення задачі, проведення машинного моделювання й аналіз отриманих результатів [14].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи обговорювались на міжнародних науково–технічних конференціях: «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (м. Харків, 2010, 2014 рр.), Крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо (м. Севастополь, 2011, 2012, 2013 рр.), «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET (м. Львів – Славське, 2012 р.), «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» РТ (м. Севастополь, 2012, 2014 рр.), International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT (м. Одеса, 2013 р.).

Публікації за темою дисертації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 15 робіт, у тому числі 6 статей в фахових науково–технічних

виданнях України [1–5] і Росії [6]; 9 тез доповідей – в матеріалах науково-технічних конференцій [7–15].

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та двох додатків. Загальний об'єм дисертації – 159 сторінок, в тому числі 1 таблиця, 58 рисунків, 118 джерел на 14 сторінках, 2 додатки на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначені задачі дослідження, зв'язок із програмами і темами НДР, сформульовано мету роботи, розв'язувані науково-технічні задачі, визначено наукову новизну та практичне значення роботи, відзначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, надано інформацію про публікації та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі проведено огляд сучасного стану теорії та техніки багатовходових систем з реконфігурованими антенами (РА). Проведено огляд технічних рішень для РА та галузей використання реконфігурованих антен: від окремих реконфігурованих випромінювачів до реконфігурованих антенних ґраток та адаптивних багатовходових систем з реконфігурованими антенами. Проведено аналіз існуючих моделей МІМО систем; показано необхідність повного електродинамічного аналізу при моделюванні МІМО систем з РА; обґрунтовано актуальність задачі побудови більш повної та точної математичної моделі таких систем. За результатами проведеного огляду сформульовано задачі дисертаційних досліджень.

У другому розділі на основі аналізу особливостей багатовходових систем з реконфігурованими антенами запропоновано при моделюванні розглядати таку систему на фізичному рівні як антену з нелінійними елементами. Розроблено електродинамічну модель багатовходової системи, яка дозволяє врахувати присутні в такій системі нелінійні ефекти, в тому числі обумовлені наявністю РА.

Запропоновано розглядати всю МІМО систему з реконфігурованими антенами як антену з нелінійними елементами (АНЕ), що складається з лінійних та нелінійних багатополіусників (рис. 1). Режим такої системи описано рівняннями стану, а параметри та характеристики — вихідними рівняннями. При цьому вхідними клемми такої АНЕ є входи джерел/ генераторів корисних сигналів і завад, а вихідними клемми — входи корисних навантажень. Лінійні багатополіусники описано матрицями S , Z або Y -параметрів.

Матриця \hat{S} на рис. 1 описує параметри всієї системи МІМО з реконфігурованими антенами та являє собою певний аналог матриці розсіювання. Елементи \hat{S} визначаються для кожного значення рівня вхідної дії з урахуванням наявності нелінійних елементів у схемі. Подана модель характеризує нелінійну МІМО систему (зокрема дозволяє розрахувати спектральну ефективність системи) при заданому рівні сигналу. Матриця \hat{Z}

описує параметри випромінюючої системи (ВС) та каналу зв'язку. Елементи $\hat{\mathbf{Z}}$ знаходяться на основі вирішення електродинамічної задачі для системи, яка включає передавальні та приймальні антени, розсіювачі та канал зв'язку, з урахуванням керуючих та перемикаючих елементів, введених у структуру випромінювачів.

Усі нелінійні елементи, що входять до складу приймально–передавальних кіл і випромінювачів, виділено в окрему підсхему (НБ, нелінійний багатополіусник), яка описується у часовій області діагональним матричним оператором:

$$\tilde{\mathbf{Q}}_N \{\cdot\} = \text{diag} \{ \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{TX}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RX}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RTX}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RRX}} \{\cdot\} \}. \quad (1)$$

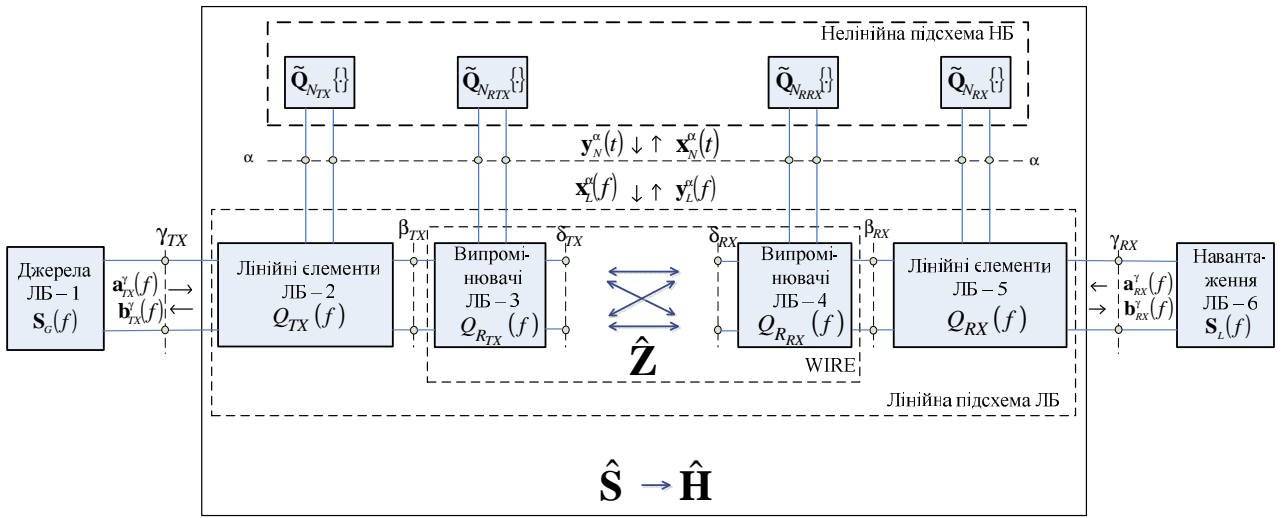


Рис. 1. Структурна схема МІМО системи з НЕ

Блоки матриці $\tilde{\mathbf{Q}}_N \{\cdot\}$ сформовано у відповідності до блоків нелінійних елементів, що входять до складу передавальних та приймальних кіл (TX і RX) і до складу передавальної та приймальної випромінюючих систем (R_{TX} і R_{RX}), та являють собою діагональні матриці операторів, що характеризують нелінійні підсхеми та задають зв'язок між входніми діями $\mathbf{x}_N^\alpha(t)$ та відгуками $\mathbf{y}_N^\alpha(t)$ на входах НБ.

Зовнішні параметри НБ пов'язані системою компонентних рівнянь:

$$\begin{cases} \mathbf{y}_{N_{TX}}^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{TX}} \left\{ \mathbf{x}_{N_{TX}}^\alpha(t) \right\} \\ \mathbf{y}_{N_{RX}}^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RX}} \left\{ \mathbf{x}_{N_{RX}}^\alpha(t) \right\} \\ \mathbf{y}_{N_{RTX}}^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RTX}} \left\{ \mathbf{x}_{N_{RTX}}^\alpha(t) \right\} \\ \mathbf{y}_{N_{RRX}}^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RRX}} \left\{ \mathbf{x}_{N_{RRX}}^\alpha(t) \right\} \end{cases}, \quad (2)$$

де $\mathbf{y}_{N^{**}}^\alpha = [\mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 1} \quad \mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 2} \quad \mathbf{b}_{N^{**}}^{\alpha 3}]^T$, $\mathbf{x}_{N^{**}}^\alpha = [\mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 1} \quad \mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 2} \quad \mathbf{a}_{N^{**}}^{\alpha 3}]^T$, T — операція транспонування; $\mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 1}$, $\mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 2}$, $\mathbf{a}_{N^{**}}^{\alpha 3}$ — вектори вхідних дій (напруг, струмів, падаючих хвиль) на відповідних входах НБ; $\mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 1}$, $\mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 2}$, $\mathbf{b}_{N^{**}}^{\alpha 3}$ — вектори відгуків (струмів, напруг, відбитих хвиль) на відповідних входах НБ; ** відповідає TX , RX , RTX або RRX .

Лінійна підсхема (лінійний багатополюсник) описується в частотній області та представлена лінійними багатополюсниками передавальної та приймальної випромінюючих систем (ЛМ–3 і ЛМ–4), лінійних елементів передавального та приймального кіл (ЛМ–2 і ЛМ–5).

Багатополюсники джерел і навантажень (ЛМ–1 і ЛМ–6) характеризуються матрицями розсіювання $\mathbf{S}_G(f)$ і $\mathbf{S}_L(f)$, що пов'язують амплітуди падаючих і відбитих хвиль на відповідних входах. Відповідно компонентні рівняння для ЛМ–1 і ЛМ–6 мають вигляд:

$$\mathbf{b}_G^\gamma(f) = \mathbf{S}_G(f) \mathbf{a}_G^\gamma(f), \quad (3.1)$$

$$\mathbf{b}_L^\gamma(f) = \mathbf{S}_L(f) \mathbf{a}_L^\gamma(f). \quad (3.2)$$

Багатополюсники випромінювачів передавального та приймального кіл ЛМ–3 і ЛМ–4 описуються змішаними матрицями $\mathbf{Q}_{R_{TX}}(f)$ і $\mathbf{Q}_{R_{RX}}(f)$. Матриця $\mathbf{Q}_{R_{TX}}(f)$ пов'язує падаючі та відбиті хвилі в перерізах $\beta_{TX} - \beta_{TX}$, $\alpha_{RTX}^3 - \alpha_{RTX}^3$, струми та напруги в перерізах $\alpha_{RTX}^1 - \alpha_{RTX}^1$, $\alpha_{RTX}^2 - \alpha_{RTX}^2$ й амплітуди збіжних та розбіжних хвиль у каналах вільного простору в перерізах $\delta_{TX} - \delta_{TX}$ багатополюсника ЛМ–3. Аналогічно вводиться й $\mathbf{Q}_{R_{RX}}(f)$. Системи компонентних рівнянь для ЛМ–3 і ЛМ–4 мають вигляд:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{R^{**}}^\alpha \\ \mathbf{b}_{R^{**}}^\beta \\ \mathbf{u}_{R^{**}}^\delta \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\alpha\alpha} & \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\alpha\beta} & \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\alpha\delta} \\ \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\beta\alpha} & \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\beta\beta} & \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\beta\delta} \\ \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\delta\alpha} & \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\delta\beta} & \mathbf{Q}_{R^{**}}^{\delta\delta} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Q}_R(f)} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{R^{**}}^\alpha \\ \mathbf{a}_{R^{**}}^\beta \\ \mathbf{u}_{i^{**}}^\delta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де ** відповідає TX або RX .

Аналогічним чином вводяться змішані матриці $\mathbf{Q}_{TX}(f)$ і $\mathbf{Q}_{RX}(f)$, що описують багатополюсники лінійних елементів.

З урахуванням отриманих компонентних рівнянь, а також умов з'єднання НБ й ЛБ, було отримано рівняння стану системи у часовій області, яке пов'язує вектори $\mathbf{x}_L^\alpha(t)$ і $\mathbf{y}_L^\alpha(t)$ через нелінійний оператор $\tilde{\mathbf{Q}}_N\{\cdot\}$:

$$\mathbf{y}_L^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N \{\mathbf{x}_L^\alpha(t)\}, \quad (5)$$

де

$$\tilde{\mathbf{Q}}_N \{\cdot\} = \text{diag} \left\{ \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{TX}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RX}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RTX}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_{RRX}} \{\cdot\} \right\},$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{N_{**}} \{\cdot\} = \text{diag} \left\{ -\tilde{\mathbf{G}}_{N_{**}} \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{R}}_{N_{**}} \{-\mathbf{E} \cdot\}, \tilde{\mathbf{S}}_{N_{**}} \{\cdot\} \right\}, \quad ** \text{ відповідає TX, RX, RTX або RRX.}$$

Розв'язання цього рівняння дає можливість розрахувати нелінійний режим досліджуваної системи.

При побудові моделі багатовходової системи виділено дві групи вихідних параметрів: 1 – параметри, які описують взаємодії всередині системи й такі характеристики системи, як спектральна ефективність; 2 – параметри, які описують взаємодію досліджуваної системи з іншими ЕД системами, тобто розподіл поля за межами системи.

Наприкінці розділу обговорюються особливості визначення зовнішніх параметрів нелінійних багатовходових систем. Зокрема показано, що для таких систем характеристики спектральної ефективності можуть коректно розглядатися тільки при фіксованому рівні вхідного сигналу.

У **третьому розділі** обґрунтовано вимоги до методики проектування систем з реконфігурованими антенами. На основі існуючих алгоритмів проектування НВЧ пристроїв, а також на основі математичної моделі МІМО системи з РА, розробленої в розділі 2, запропоновано методику й алгоритм проектування систем з реконфігурованими антенами. На основі генетичного алгоритму оптимізації розроблено алгоритм і описано реалізовану програму оптимізації реконфігурованих антен з нелінійними елементами, а також наведено результати її верифікації.

Стосовно до задачі проектування реконфігурованих антен загальний алгоритм проектування має вигляд, наведений на рис. 2.

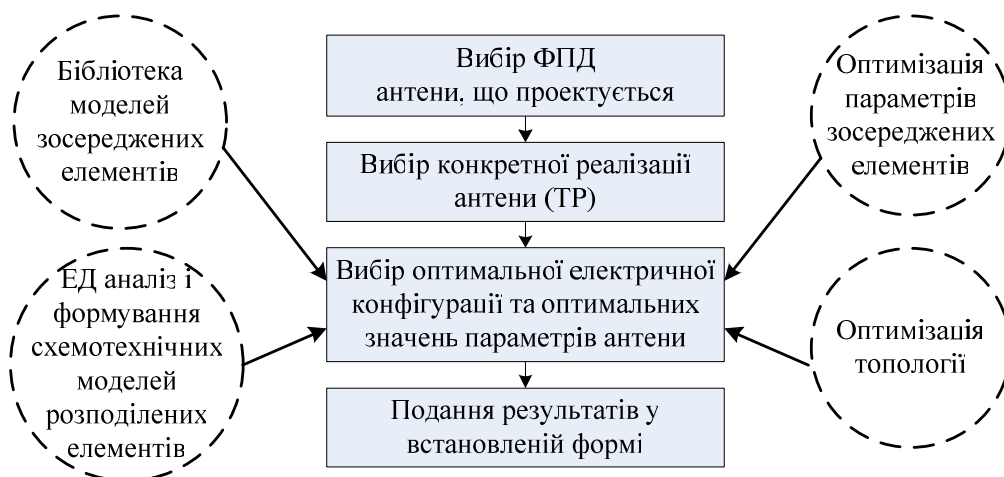


Рис. 2. Загальний алгоритм проектування реконфігурованих антен

Перший блок алгоритму (вибір фізичного принципу дії, ФПД) відповідає вибору елементної бази пристрою, що проектується (проводові, стрічкові, мікrostрічкові антени тощо), та вибору механізму реконфігурації

випромінювачів. Другий блок (вибір технічного рішення, ТР) включає вибір конкретного типу антени (фрактальна, щілинна, вібраторна, патч–випромінювач, перевернута F, антена–бабочка тощо). Третій блок алгоритму проектування РА (оптимізація електричної конфігурації та параметрів) включає в себе вирішення задач параметричного і структурного синтезу антени, що проектується, в рамках обраного технічного рішення відповідно до заданих критеріїв якості.

Методика проектування багатовходових реконфігурованих систем має задовольняти певним вимогам. По-перше, вона має дозволяти визначення параметрів всіх типів елементів, які входять до складу системи, з урахуванням особливостей кожного з них (лінійних/ нелінійних, зосереджених/ розподілених, аналогових/ дискретних тощо). По-друге, в рамках методики проектування має бути реалізована взаємодія між окремими «блоками» системи та враховані існуючі між ними взаємні зв'язки. І, нарешті, має бути передбачено одноманітне подання характеристик складових частин системи, для можливості аналізу всієї системи в цілому.

З урахуванням наведених вимог було розроблено розгорнутий алгоритм проектування реконфігурованих антенних систем, блок–схему якого наведено на рис. 3.

На кожному етапі запропонованого алгоритму наведені вище вимоги враховано шляхом сумісного використання програмних продуктів різного рівня. Відповідно до особливостей кожного з блоків багатовходової системи, для кожного з них обирається найкраще з точки зору точності отримуваних результатів та часових витрат середовище моделювання (наприклад, ЕД моделювання для систем провідних випромінювачів; 2,5D або 3D ЕД моделювання для більш складних електродинамічних структур; схемотехнічне моделювання для елементів із зосередженими параметрами тощо).

Аналіз всієї системи здійснюється в середовищі електродинамічного моделювання, за рахунок чого враховуються взаємні зв'язки та взаємодії між всіма елементами багатовходової системи. Такий аналіз стає можливим завдяки одноманітному поданню всіх блоків системи у вигляді багатополісників, які описуються матрицями S, Z або Y параметрів; а також за рахунок реалізації в використаних пакетах програм єдиного подання вихідних даних (розрахованих параметрів багатополісників) у форматі Touchstone.

У дисертаційній роботі на базі генетичного алгоритму (ГА) розроблено і програмно реалізовано модуль оптимізації багатовходових реконфігурованих антен. Він дозволяє проводити оптимізацію провідних РА складної конфігурації, до складу яких входять зосереджені елементи з керованими нелінійними характеристиками, зміна яких може здійснюватися дискретно або безперервно.

В алгоритмі оптимізації для обчислення цільової функції (ЦФ) використано математичну модель багатовходової системи з РА, запропоновану в розділі 2. Розроблена модель базується на методі інтегральних рівнянь. Реалізується рішення інтегрального рівняння Поклінгтона відносно розподілу струмів вздовж провідників антенної системи за допомогою методу Гальоркіна

з подальшим визначенням параметрів та характеристик антенної системи (кількість можливих каналів передачі, спектральна ефективність тощо).

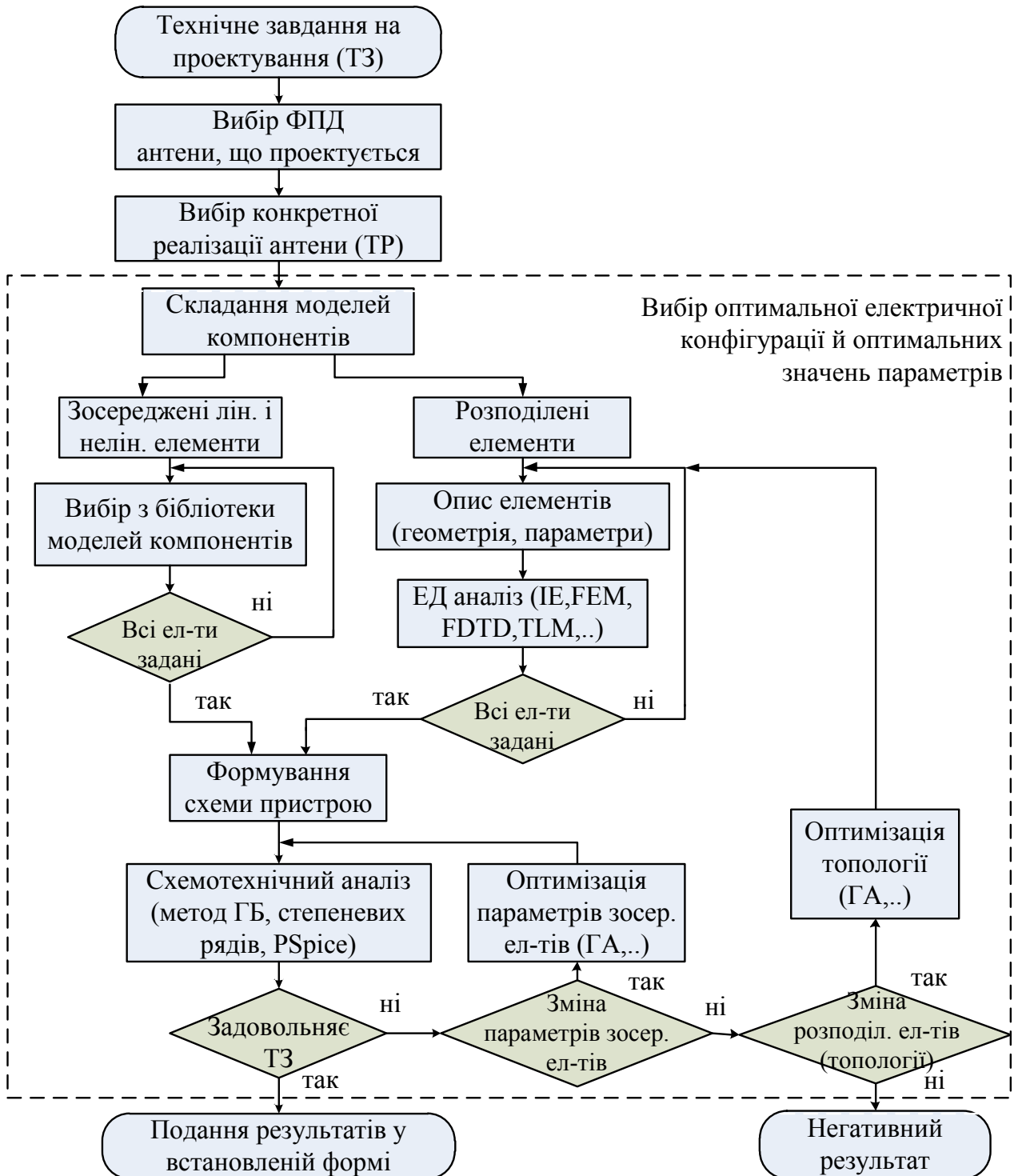


Рис. 3. Розгорнутий алгоритм проектування реконфігурованих антенних систем

Особливість реалізованого алгоритму полягає в тому, що всі операції ГА проводяться з числами (параметрами ЦФ) у бінарному поданні. При розрахунках значення ЦФ (для подальшого сортування осіб за зростанням ЦФ) здійснюється перетворення параметрів ЦФ у десяткові значення.

Представлені в роботі алгоритм і програма оптимізації використовуються у складі запропонованої методики проектування багатовходових систем з реконфігурованими антенами. Розроблена програма оптимізації на базі ГА OPT_GA входить до пакету програм WIRE_MIMO, призначеного для аналізу та проектування багатовходових реконфігурованих випромінюючих систем.

У четвертому розділі наведено результати числового моделювання MIMO систем з РА із застосуванням запропонованих методики й алгоритму проектування реконфігурованих антенних систем, а також математичної моделі MIMO системи з РА. Описано особливості конкретного варіанту методики й алгоритму, використаного для дослідження РА, виконаних на основі тонкопроводових випромінювачів довільної конфігурації.

На прикладі $2TX \times 2RX$ MIMO системи симетричних випромінювачів показано залежність характеристик багатовходової системи від міжелементної відстані d/λ при різних способах узгодження випромінювачів (рис. 5).

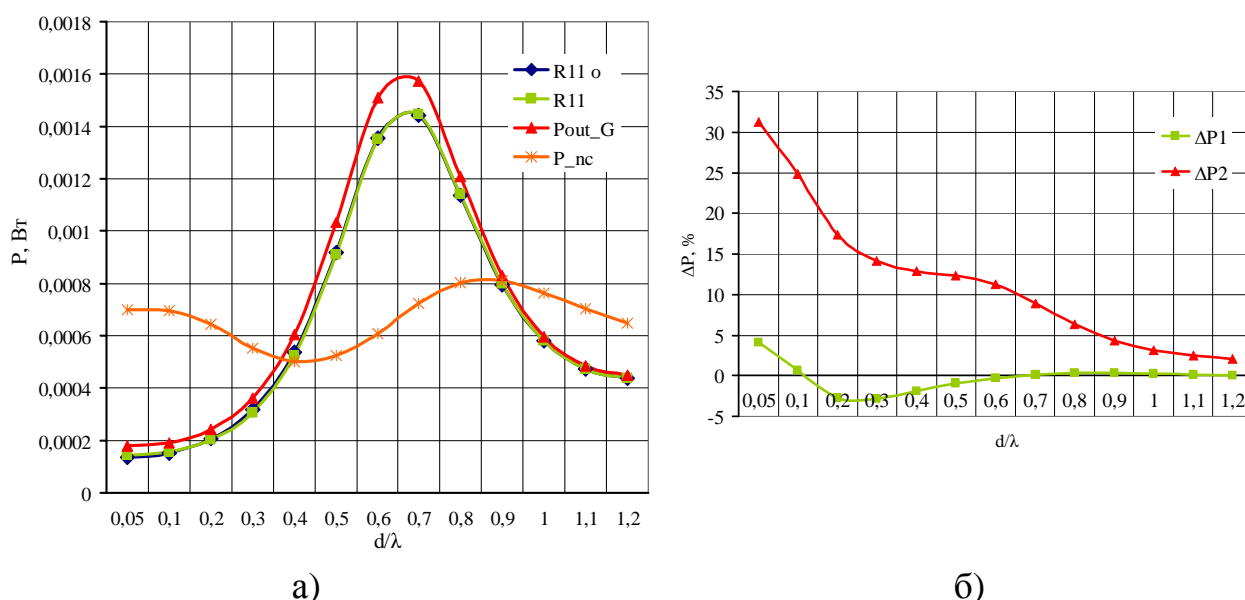


Рис. 5. Залежність характеристик багатовходової системи від міжелементної відстані d/λ при різних способах узгодження випромінювачів.

- а) Залежність сумарної потужності на входах приймачів при узгодженні: R11 o – з поодиноким відокремленим випромінювачем; R11 – з поодиноким випромінювачем у складі ґратки ($|S_{11}| \rightarrow \min$); Pout_G – при одночасному узгодженні всіх входів ґратки ($|\Gamma_1| \rightarrow \min$); P_nc – випадок відсутності взаємних зв'язків між випромінювачами. б) Залежність зміни потужності на входах приймачів відносно випадку узгодження з відокремленим випромінювачем: $\Delta P1$ – узгодження за $|S_{11}| \rightarrow \min$, $\Delta P2$ – узгодження за $|\Gamma_1| \rightarrow \min$

Зокрема показано, що при узгодженні з точки зору $|S_{11}| \rightarrow \min$ використання узгоджувальних кіл (УК), розрахованих для кожного випадку міжелементної відстані (узгодження з поодиноким випромінювачем у складі ґратки, R11 на рис. 5, а), не дає суттєвого збільшення потужності на входах приймальних пристроїв порівняно з випадком використання УК, розрахованого для відокремленого випромінювача (при узгодженні з поодиноким відокремленим випромінювачем, R11 o на рис. 5, а). Узгодження з точки зору

мінімуму модуля коефіцієнта відбиття $|\Gamma_1| \rightarrow \min$ (при одночасному узгодженні всіх входів ґратки, R_{out_G} на рис. 5, а) забезпечує більш суттєве збільшення рівня потужності на входах приймачів порівняно із випадком узгодження з точки зору $|S_{11}| \rightarrow \min$ (R11 на рис. 5, а).

Ефект від застосування УК, розрахованих для кожної міжелементної відстані, наступний. При узгодженні за $|S_{11}| \rightarrow \min$ зміна потужності на входах приймачів несуттєва (відносно випадку узгодження за допомогою УК, розрахованого для відокремленого випромінювача) і становить частки та одиниці відсотка ($\Delta P1$ на рис. 5, б). При узгодженні з точки зору $|\Gamma_1| \rightarrow \min$, збільшення сумарної потужності на входах приймачів є більш суттєвим – 20...30 відсотків ($\Delta P2$ на рис. 5, б). Зі збільшенням міжелементної відстані різниця в якості узгодження цими двома способами зменшується, оскільки зменшується величина взаємного зв'язку між випромінювачами. При зменшенні міжелементної відстані, $d < (0,5 \dots 0,6) \cdot \lambda$, взаємний вплив випромінювачів зростає й відповідним чином розраховане УК дозволяє істотно збільшити потужність, що надходить на входи приймачів.

Досліджено вплив інтермодуляційних (ІМ) завад на спектральну ефективність (СЕ) багатовходової системи. У випадку слабкої нелінійності характер частотної залежності спектральної ефективності є майже таким, як і для лінійної системи (рис. 6, а). У випадку помірної нелінійності, й відповідно появи ІМ завади, зі зменшенням рівня шумів спектральна ефективність системи зростає (і наближується до значень лінійної системи) лише за межами робочої смуги частот передавальних антен (рис. 6, б). Поблизу робочої частоти спостерігається провал частотної характеристики з того моменту, коли складова завади починає переважати над шумовою складовою (починаючи зі значень $P_{sh} < 10^{-5}$).

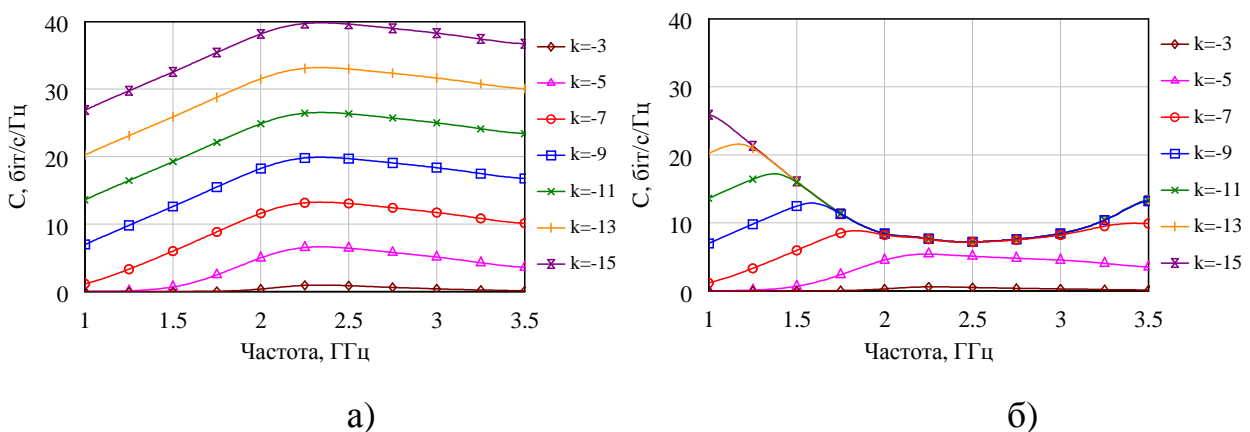


Рис. 6. Частотна залежність спектральної ефективності при різних потужності шуму $P_{sh} = 10^k$, мВт: а) система з лінійними характеристиками; б) система з урахуванням нелінійності

Така поведінка частотної залежності СЕ пояснюється тим, що в режимі помірної нелінійності при відстроюванні від робочої частоти амплітуди ІМ

складових вищих порядків (сигналів завад) зменшуються істотно швидше порівняно з амплітудами основних сигналів (рис. 7).

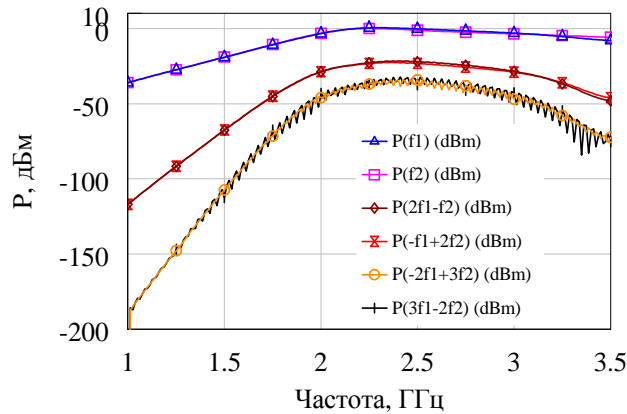


Рис. 7. Частотна залежність потужності комбінаційних складових системи $2TX \times 2RX$ (дБм) для випадку помірної нелінійності

Досліджено вплив зосереджених завад на спектральну ефективність багатовходової системи. Показано, що у випадку слабкої нелінійності, як і в лінійному випадку, в спектрі сигналу приймальних антен присутні тільки частотні складові на частотах корисного сигналу і сигналу завади. Відповідно поведінка частотної залежності спектральної ефективності є передбачуваною і не відрізняється від лінійного випадку: величина СЕ зростає зі зменшенням потужності шуму (рис. 8, а).

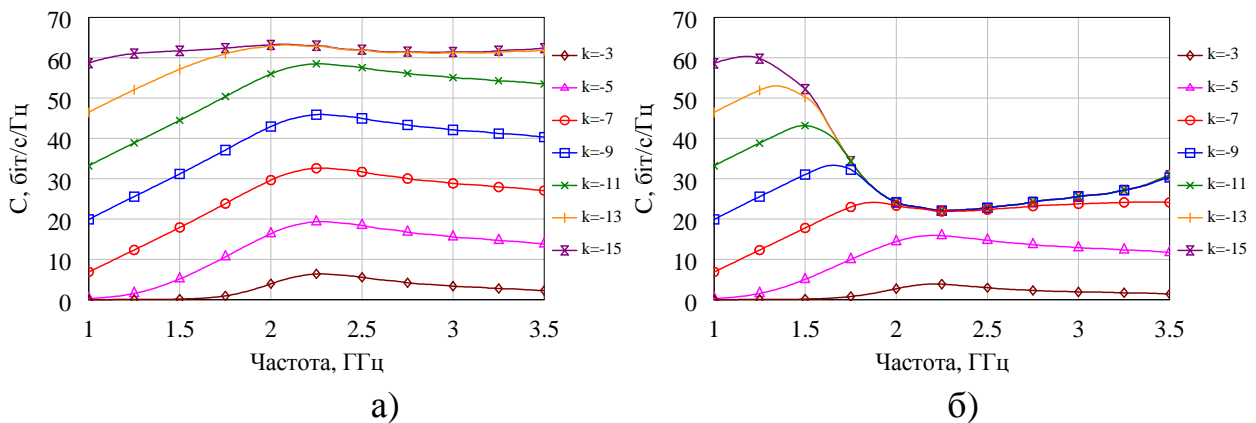


Рис. 8. МІМО система $2TX \times 2RX$ із завадою на частоті $f_i = 2,501 \text{ ГГц} \approx f_0$. Частотна залежність спектральної ефективності при різній потужності шуму $P_{sh} = 10^k$, мВт: а) система з лінійними характеристиками; б) система з урахуванням нелінійності

У випадку помірної нелінійності в прийнятому сигналі з'являються інтермодуляційні складові вищих порядків, найбільш істотними з яких є складові третього та п'ятого порядків. Показано, що це призводить до перерозподілу потужності між основною та побічними частотними складовими

і, як наслідок, до зменшення спектральної ефективності системи поблизу робочої частоти (рис. 8, б).

Таким чином, показано, що під дією зосередженої за частотою завади на фоні шумів на багатовходову систему з НЕ, поведінка СЕ такої системи відрізняється від лінійного випадку: зі зменшенням шумової компоненти зростання СЕ спостерігається до тих пір, доки не почне переважати складова завади. Подальше зменшення шумової складової призводить до того, що поблизу f_0 спостерігається провал частотної характеристики (зростання СЕ спостерігається лише поза робочим діапазоном частот, там, де амплітуди ІМ складових вищих порядків згасають швидше, ніж амплітуди корисних сигналів).

На основі отриманих характеристик частотної залежності спектральної ефективності МІМО системи, в якій присутні елементи з нелінійними характеристиками (зокрема, ПЕ й КЕ у складі реконфігурованих антен), зроблено висновок, що шляхом зміни частотних характеристик реконфігурованих антен може здійснюватися керування спектральною ефективністю такої системи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково–прикладну задачу розвитку методів аналізу та оптимізації багатовходових реконфігурованих антенних систем. Задачу вирішено шляхом розробки нової більш коректної моделі, яка враховує нелінійні ефекти, що виникають у досліджуваних системах через наявність в їхньому складі елементів та пристроїв із нелінійними властивостями, а також шляхом розробки методики й алгоритмів аналізу та оптимізації таких систем.

Відповідно до поставленої мети в дисертації отримано наступні наукові та практичні результати.

1. На основі проведеного аналізу існуючих рішень у галузі МІМО систем показано, що один із шляхів покращення їх характеристик полягає у використанні реконфігурованих антен в якості випромінюючих елементів таких систем. Відзначено, що наявність керуючих елементів у складі РА призводить до необхідності розглядати систему МІМО як нелінійну багатовходову систему. Виконано класифікацію існуючих моделей багатовходових систем і показано, що більшість розроблених до теперішнього часу моделей базується на припущенні про лінійність каналів МІМО системи, а відомі нелінійні моделі носять поодинокий характер. Тому актуальною є задача побудови коректної математичної моделі реальної багатоантенної системи МІМО, у складі якої присутні пристрої з лінійними та нелінійними властивостями.

2. Для багатовходової системи з реконфігурованими антенами розроблено нелінійну математичну модель електродинамічного рівня. В її основу покладено модель антен з нелінійними елементами. Відповідно до розробленої моделі вся МІМО система, що включає в себе передавальну, приймальну системи та систему розсіювачів, розглядається як єдина багатовходова антена,

до складу якої входять елементи з нелінійними характеристиками. Наведено узагальнену структурну схему нелінійної МІМО системи та компонентні рівняння блоків, що входять до неї.

3. Отримано рівняння стану такої системи. Обґрунтовано вибір вектору вихідних параметрів багатовходової системи та запропоновано структурувати його компоненти таким чином, що одна з груп вихідних параметрів характеризує процеси перетворення сигналів у самій системі, а друга – процеси електродинамічної взаємодії досліджуваної системи з іншими ЕД системами, тобто міжсистемну взаємодію. Така модель дозволяє дослідити все різноманіття нелінійних ефектів, пов'язаних як із виникненням нових спектральних складових, так і з нелінійною залежністю її характеристик від рівня вхідної дії. При цьому враховуються як нелінійні ефекти, що виникають у самій системі, так і ефекти, що утворюються за рахунок міжсистемної взаємодії.

4. Показано, що розв'язання рівнянь стану дозволяє визначити каналну матрицю нелінійної МІМО системи. Відзначено, що методи визначення спектральної ефективності багатовходових систем, що базуються на ортогоналізації каналної матриці, непридатні для нелінійних систем. Обґрунтовано методику визначення спектральної ефективності таких систем.

5. На базі розробленої моделі запропоновано методику й алгоритм проектування багатовходових систем з реконфігурованими антенами, що мають достатню гнучкість та універсальність. Вони дають можливість, в залежності від структури системи та особливостей її функціонування, на етапі моделювання використовувати моделі вузлів або пристроїв різного рівня складності – від макромоделей до моделей електродинамічного рівня; використовувати різні числові методи та розроблені до теперішнього часу пакети програм електродинамічного та схемотехнічного моделювання. Для забезпечення інтерфейсу між різними програмами моделювання, запропоновано використовувати файли даних у форматі Touchstone, підтримка яких реалізована практично в усіх існуючих пакетах моделювання. Застосування запропонованої методики й алгоритму дає також можливість дослідження систем, антени яких можуть знаходитися на невеликій відстані одна від одної або від відбиваючих структур.

6. Для числової реалізації запропонованої методики й алгоритму розроблено програмні засоби, що призначені для аналізу випромінюючих структур РА у тонкопроводовому наближенні (пакет WIRE_MIMO) та їхньої оптимізації з використанням генетичного алгоритму (OPT_GA). Пакет WIRE_MIMO, окрім свого основного призначення – формування моделі тонкопроводової випромінюючої структури як компонента нелінійної багатовходової реконфігурованої антенної системи, може бути використаний самостійно – для визначення спектральної ефективності лінійних МІМО систем.

7. Проведено моделювання деяких простих МІМО систем з РА, результати якого, зокрема, показали наступне.

7.1. Взаємний зв'язок між випромінювачами у приймальних та передавальних антенах призводить до зміни потужності сигналу, що надходить на приймальну антену, і, як наслідок, до зміни спектральної ефективності МІМО системи. При цьому можливі такі варіанти розміщення випромінювачів, коли СЕ слабонелінійної МІМО системи із взаємодіючими випромінювачами перевищує СЕ системи із невзаємодіючими випромінювачами більш ніж в 2,5 рази. Цей результат підтверджується результатами, отриманими іншими авторами для лінійних МІМО систем, що свідчить про коректність моделі, запропонованої в даній роботі.

7.2. Наявність елементів з нелінійними характеристиками призводить до зменшення спектральної ефективності системи за рахунок появи поряд із шумами додаткових ІМ завад. При цьому частотна характеристика спектральної ефективності нелінійної системи в смузі пропускання РА істотно відрізняється від характеристики лінійної системи. Ця відмінність залежить від ступеню нелінійності характеристик КЕ, потужності випромінювання передавальних антен, рівня сигналів завади. При сильній нелінійності керуючих елементів СЕ може зменшитися більш ніж в два рази.

7.3. На основі аналізу отриманих результатів дослідження спектральної ефективності МІМО системи з нелінійними характеристиками показано, що шляхом зміни частотних характеристик вхідного опору реконфігурованих антен може здійснюватись керування спектральною ефективністю такої системи. Додаткова можливість підвищення спектральної ефективності МІМО систем полягає у керуванні діаграмами спрямованості приймальних та передавальних антен, однак це питання потребує подальших досліджень.

8. Результати дисертаційної роботи використано при виконанні д/б НДР № 260–5 і № 270–1, а також впроваджено в учбовий процес Харківського національного університету радіоелектроніки. Практичну значимість отриманих результатів підтверджено актами про впровадження.

Таким чином можна зробити висновок, що мета дисертаційного дослідження – розвиток методів аналізу та оптимізації багатовходових реконфігурованих антенних систем – досягнута й усі поставлені задачі цілком вирішені.

ПЕРЕЛІК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лучанинов А.И. Математическая модель реконфигурируемых антенн / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Скорикова // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.–техн. сб. – 2010. – № 161. – С. 25–36.

2. Лучанинов А.И. Структурный синтез реконфигурируемых антенн / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Скорикова // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/9(46). – С. 28–34.

3. Лучанинов А.И. Исследование свойств нелинейных неконвергентных электродинамических устройств / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Вишнякова, В.А. Назаренко // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 6/5 (54). – С. 68–72.

4. Лучанинов А.И. Результаты исследования нелинейных эффектов в микрополосковых линиях с ВТСП / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Вишнякова // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 2/9 (56). – С. 4–8.

5. Лучанинов А.И. Моделирование нелинейных эффектов в ВТСП фильтрах / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Вишнякова // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.–техн. сб. – 2012. – № 169. – С. 239–242.

6. Вишнякова Ю.В. Использование теории антенн с нелинейными элементами для анализа ММО систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы: Всеросс. науч.–техн. журнал. – 2013. – № 4(12). – С. 5–22.

7. Гавва Д.С. Математическая модель проволочной излучающей системы реконфигурируемых антенн / Д.С. Гавва, Я.Г. Сидоров, Ю.В. Скорикова // 14–й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума Ч.1. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С. 85.

8. Скорикова Ю.В. Особенности задачи структурного синтеза реконфигурируемых антенн / Ю.В. Скорикова, А.И. Лучанинов // 21–я Международная Крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): Материалы конф. в 2 т., Т.2. – Севастополь: Вебер, 2011. – С. 543–544.

9. Luchaninov A.I. Modeling of Nonlinear Effects in HTSC Filters / A.I. Luchaninov, D.S. Gavva, E.V. Krykun, J.V. Vishniakova // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XI International Conference TCSET'2012. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. – PP. 176–177.

10. Вишнякова Ю.В. Реализация генетического алгоритма для синтеза реконфигурируемых антенн // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012»: Материалы 8-й междунар. молодежной науч.–техн. конф. – Севастополь: изд–во СевНТУ, 2012. – С. 201.

11. Вишнякова Ю.В. Алгоритм проектирования реконфигурируемых антенн / Ю.В. Вишнякова, А.И. Лучанинов // 22–я Международная Крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): Материалы конф. в 2 т., Т.2. – Севастополь: Вебер, 2012. – С. 491–492.

12. Вишнякова Ю.В. Математическая модель ММО системы с учетом нелинейных эффектов / Ю. В. Вишнякова, А.И. Лучанинов — 23–я Международная Крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013): Материалы конф. в 2 т., Т.2. – Севастополь: Вебер, 2013. – С. 967–968.

13. Vishniakova J.V. Application of antenna theory with nonlinear elements for MIMO analysis / J.V. Vishniakova, A.I. Luchaninov // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Odessa, 2013. – PP. 166–168.

14. Вишнякова Ю.В. Влияние интермодуляционных помех на пропускную способность ММО системы с нелинейными элементами /

Ю.В. Вишнякова, А.А. Хижа // 18-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума, Т.3. – Харьков: ХНУРЭ, 2014. – С. 9–10.

15. Вишнякова Ю.В. Влияние сосредоточенных помех на пропускную способность ММО системы с нелинейными элементами. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014»: Материалы 10-й междунар. молодежной науч.-техн. конф. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2014. — С. 85.

АНОТАЦІЯ

Вишнякова Ю.В. Розвиток методів аналізу та оптимізації багатовходових реконфігурованих антенних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

У дисертаційній роботі була поставлена та вирішена актуальна науково-прикладна задача розвитку методів аналізу та оптимізації багатовходових реконфігурованих антенних систем.

На підставі аналізу сучасного стану досліджень в галузі ММО систем обґрунтовано необхідність побудови коректної математичної моделі реальної нелінійної системи ММО.

Запропоновано новий підхід, а також розроблено нелінійну математичну модель електродинамічного рівня багатовходової системи з РА на основі теорії антен з нелінійними елементами.

Запропоновано методику й алгоритм проектування багатовходових систем з РА, що мають достатню гнучкість та універсальність.

Для числової реалізації запропонованої методики й алгоритму розроблено програмні засоби для аналізу РА у тонкопроводовому наближенні та їхньої оптимізації з використанням генетичного алгоритму.

Запропоновані методика та пакет програм використані для моделювання деяких простих ММО систем з РА. Результати моделювання, зокрема, показали, що шляхом зміни частотних характеристик вхідного опору реконфігурованих антен може здійснюватись керування спектральною ефективністю багатовходової системи.

Ключові слова: реконфігурована антена, нелінійні ефекти, багатоантенна багатовходова система, оптимізація, антена з нелінійними елементами.

АННОТАЦИЯ

Вишнякова Ю.В. Развитие методов анализа и оптимизации многовходовых реконфигурируемых антенных систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – антенны и устройства микроволновой техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научно–прикладная задача развития методов анализа и оптимизации многовходовых реконфигурируемых антенных систем. Задача решена путем разработки новой более корректной модели, которая учитывает нелинейные эффекты, возникающие в исследуемых системах из–за наличия в них элементов и устройств с нелинейными свойствами, а также за счет разработки методики и алгоритмов анализа и оптимизации таких систем.

Согласно поставленной цели в диссертации решены следующие задачи.

На основе проведенного анализа существующих решений в области ММО систем обоснована необходимость построения корректной математической модели реальной многоантенной системы ММО, в составе которой присутствуют устройства с линейными и нелинейными свойствами.

Для многовходовой системы с реконфигурируемыми антеннами разработана нелинейная математическая модель электродинамического уровня, в основу которой положена модель антенн с нелинейными элементами. При таком подходе учитываются как нелинейные эффекты, возникающие в самой системе, так и эффекты, образующиеся за счет межсистемных взаимодействий.

На основе разработанной модели предложены методика и алгоритм проектирования многовходовых систем с реконфигурируемыми антеннами, обладающие достаточной гибкостью и универсальностью. Для численной реализации предложенной методики и алгоритма проектирования разработаны программные средства, предназначенные для анализа излучающих структур РА в тонкопроволочном приближении и их оптимизации с использованием генетического алгоритма.

С использованием разработанных моделей и алгоритмов проведено моделирование некоторых простейших ММО систем с РА, результаты которого, в частности, показали следующее. Наличие элементов с нелинейными характеристиками приводит к уменьшению спектральной эффективности системы за счет появления наряду с шумами дополнительных ИМ помех. При этом частотная характеристика спектральной эффективности нелинейной системы в полосе пропускания РА существенно отличается от характеристики линейной системы. Также показано, что путем изменения частотных характеристик входного сопротивления реконфигурируемых антенн может осуществляться управление спектральной эффективностью ММО системы.

Ключевые слова: реконфигурируемая антенна, нелинейные эффекты, многоантенная многовходовая система, оптимизация, антенна с нелинейными элементами.

ABSTRACT

Vishniakova J.V. Analysis and optimization methods development for multiport reconfigurable antenna systems. – Manuscript.

Thesis for the Candidate of Technical Sciences degree in speciality 05.12.07 – antennas and microwave devices. – Kharkov National University of Radioelectronics, Kharkov, 2014.

In this thesis an actual scientific and applied problem is solved, devoted to the analysis and optimization methods development for multiport reconfigurable antenna systems.

Based on the state-of-the-art survey in the field of MIMO-RA systems, the necessity of the correct mathematical model, as well as the methodology and design algorithm development for such systems, is substantiated.

A mathematical model of the multiport-RA system is developed, which takes into account mutual couplings and nonlinear effects emerging in such systems.

Sufficiently versatile technique and algorithm for MIMO-RA systems design are developed. The algorithm is developed and the software is implemented for reconfigurable thin-wire antenna system optimization, taking into account the nonlinear properties of switching and control elements, both discrete and analog.

The models and methods developed are used for the multiport-RA systems numerical analysis and their performance evaluation.

Keywords: reconfigurable antenna, nonlinear effects, multiantenna multiport system, optimization, antenna with nonlinear elements.

Підп. до друку 24.09.14.
Умов. друк. арк. 1,2.
Ціна договірна.

Формат 60×84 1/16.
Облік. вид. арк. 1,0.

Спосіб друку – ризографія.
Тираж 100 прим.

Віддруковано ФЛП Андреев. К.В.
61166, Харків, ул. Серповая, 4

