

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**Марков Василь Іванович**

УДК 621.396.67

**НАСТРОЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ФАР  
З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ  
АНТЕН**

**05.12.07 — антени та пристрої мікрохвильової техніки**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Харків — 2012**

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Усін Володимир Ананійович,**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, м. Харків,  
професор кафедри основ радіотехніки.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Горобець Микола Миколайович,**  
Харківський національний університет  
ім. В.Н. Каразіна, м. Харків,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

доктор технічних наук, професор  
**Єрмаков Геннадій Валентинович,**  
Академія Внутрішніх Військ МВС України,  
професор кафедри управління діями підрозділів із  
засобами військового зв'язку.

Захист відбудеться 13 червня 2012 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету  
радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного  
університету радіоелектроніки за адресою 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розіслано " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

**В.М. Безрук**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Необхідність поліпшення технічних характеристик і розширення функціональних можливостей радіотехнічних систем (РТС) різного цільового призначення (радіолокація, радіонавігація, радіоуправління, космічний зв'язок, телекомунікаційні системи) привело до створення принципово нових антенних систем - багатофункціональних фазованих антенних решіток (ФАР).

На сьогодні головними чинниками, що стримують прогрес в застосуванні багатофункціональних РТС із ФАР, є, з одного боку, їхня висока вартість, а з іншого - складність і трудомісткість операцій настроювання, контролю і підтримки технічного стану під час експлуатації. Особливу актуальність набули питання автоматизації процесів настроювання, створення автоматизованих вимірювальних комплексів, проведення контролю технічного стану (КТС) і розробки методології проведення приймально-здавальних випробувань багатоканальних ФАР. Це обумовлено необхідністю виміру занадто великої кількості амплітудно-фазових розподілів (АФР) поля та розрахунку амплітудних і фазових поправок, необхідних для вирівнювання великої кількості комплексних коефіцієнтів передачі каналів у режимах ПРИЙОМ і ПЕРЕДАЧА при ширококутнім скануванні з різними формами діаграм спрямованості для всіх робочих частот.

Основні технічні характеристики ФАР істотно залежать від параметрів мікрохвильових трактів, до складу яких входять діаграмоутворююча схема та практично вся сукупність функціональних вузлів ФАР. Для зменшення впливу дестабілізуючих факторів (температури, старіння елементів, випадкових відмов та ін.) на параметри ФАР необхідно забезпечити оперативний КТС та підтримку параметрів (калібрування) у жорстких умовах експлуатації ФАР.

Для вирішення цих задач до складу ФАР включаються вбудовані системи контролю й калібрування (ВСКК), які охоплюють НВЧ-тракти розподілу потужності зондуючих і гетеродинних сигналів, приймально-передавальні модулі (ППМ) та випромінюючу систему. Наявність ВСКК забезпечує проведення КТС, діагностування відмов складових частин ФАР і підтримку АФР на апертурі близьким до теоретичного та, відповідно, інтегральних параметрів ФАР у процесі експлуатації.

Проблеми антенних та трактових вимірювань привертають велику увагу як в нашій країні, так і за кордоном. Суттєвий внесок у теорію та практику цих вимірювань зробили Бахрах Л.Д., Бубнов Г.Г., Гімпілевич Ю.Б., Горобець М.М., Гузь В.І., Кавалеров Д.О., Каплан Э.Н., Курочкін О.П., Леманський А.А., Турчин В.В., Усін В.А., Цейтлін Н.М., Шифрін Я.С., Gregson S., [Hansen](#) J.E., Evans G.E., Hollis J.S., Lyon T.J., Rahmat-Samii Y., Slater D., Yaghjian A.D. та багато інших.

Разом з тим, треба звернути увагу на те, що ряд принципово важливих питань пов'язаних із проведенням КТС, виміром характеристик, настроюванням і калібруванням ФАР залишаються невирішеними, а велика кількість суто теоретичних напрацювань були обмежені комп'ютерним моделюванням з

використанням спрощених моделей і до цього часу не підтверджена практичним використанням. Тому удосконалення та розробка нових математичних моделей, алгоритмів, методології проведення КТС і настройки, що враховують вплив ряду факторів та конструкторсько-технологічних обмежень є дуже важливою задачею. Особливо слід відмітити необхідність: оптимізації процесу настроювання багатоканальних ФАР, у яких для настроювання можуть бути використані тільки фазообертачі (ФО), загальні для всіх каналів; урахування нелінійних властивостей амплітудно-фазових характеристик фазообертачів і атенуаторів при зміні їх стану та взаємних зв'язків випромінювачів при ширококутнім скануванні.

Саме тому тема дисертаційної роботи «Настроювання та контроль технічного стану ФАР з урахуванням конструктивних особливостей антен» є актуальною й має важливе практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась в Харківському національному університеті радіоелектроніки на кафедрі ОРТ та в науково-дослідному інституті «Квант» і безпосередньо пов'язана з тематикою ряду науково-дослідних робіт (НДР) та дослідно-конструкторських робіт (ДКР), виконаних за участю автора, серед яких: НДР «Автоматизований вимірювальний стенд для виміру параметрів антенних пристроїв виробу 79К6» № ДР 0100U004653; "Розробка імітаційно-моделюючого комплексу для проведення моделювання по НДР "Призма-2М", № ДР 0196U002646; ДКР "Антенний пристрій виробу "Sea Lion" за міжнародним контрактом № Н093-2001DOCX/X47032UR/USE-16/2-144-К/КЕ-01 та ДКР "Виріб «Фенікс - У» (складова частина ДКР «Простір - Ф-58250»), № ДР РК0108U000066Т, у яких автор брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Основною метою даної роботи є подальший розвиток автоматизованих вимірювальних комплексів (АВК) з поліпшеними метрологічними характеристиками і методології вимірювання параметрів та настроювання ФАР, а також ВСКК для забезпечення їх калібрування та контролю технічного стану в умовах впливу широкого класу дестабілізуючих факторів при експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні **завдання**:

- провести аналіз існуючих методів настроювання ФАР, розробити та експериментально дослідити методику та алгоритми настроювання багатоканальних ФАР у яких для настроювання можуть бути використані тільки фазообертачі, загальні для всіх каналів;
- удосконалити амплітудний метод антенних вимірювань для підвищення достовірності і точності визначення параметрів відхилених променів ФАР;
- розробити і експериментально дослідити методику проведення настроювання ФАР, яка враховує взаємні зв'язки випромінювачів при ширококутнім скануванні та виробити пропозиції по скороченню часу проведення робіт;

- розробити і дослідити математичну модель ФАР з урахуванням нелінійних властивостей амплітудно-фазових характеристик ФО і атенюаторів при зміні їх стану та алгоритми, що дозволяють одержати незміщену оцінку параметрів приймально-передавальних модулів (ППМ) при КТС та підвищити точність визначення поправок при калібруванні ФАР;
- провести вибір місць розташування випромінювачів контрольного сигналу ВСКК у ближній зоні.

**Об'єктом дослідження** є процеси антенних вимірювань, калібрування та КТС ФАР.

**Предметом дослідження** є математичні моделі ФАР, методи проведення КТС, розрахунку АФР на апертурі і визначення параметрів та відповідних поправок для настройки ФАР, методи та алгоритми обробки вимірювальної інформації, що реалізовані на основі цих методів.

**Методи досліджень.** При розв'язанні поставлених задач використані наступні методи дослідження: методи математичного моделювання та статистичної теорії антенних вимірювань – при оцінці похибок вимірювання параметрів ФАР та результатів КТС; метод найменших квадратів – для мінімізації похибки визначення ККПК за рахунок надмірності системи рівнянь; методи теорії ймовірностей – при дослідженні метрологічних характеристик АВК та ВСКК; а також експериментальні дослідження АВК та ВСКК на зразках ФАР різного типу.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Результати досліджень є новими як методологічно, так й у частині висновків і рекомендацій. До основних з них можна віднести наступні:

1. Уперше запропоновані методика, алгоритми та програмне забезпечення для настроювання багатоканальних ФАР з обмеженим числом регульовальних елементів, яких до цього часу не існувало.
2. Вдосконалена методика настроювання ФАР відмінністю якої є настройка по секторам відхилення променя, що дає змогу врахувати вплив зміни взаємних зв'язків випромінювачів на ДС при ширококутнім скануванні.
3. Уперше запропонований комбінований метод визначення параметрів відхилених променів ФАР, відмінність якого полягає в тому, що в якості початкової оцінки використовує отримані за допомогою АВК наближені дані про амплітудно-фазовий розподіл та напрямок головного максимуму ДС.
4. Розроблено математичну модель ФАР, яка, на відміну від існуючих, враховує нелінійні властивості амплітудно-фазових характеристик фазообертачів при зміні їх стану, алгоритми, програмне забезпечення та одержано вирази, що дозволяють отримати незміщену оцінку ККПК при проведенні КТС.
5. Розроблені новий імітаційно-моделюючий комплекс та програмне забезпечення для розрахунків, моделювання і аналізу процесу вимірювання характеристик ФАР, вибору місць розташування випромінювачів

контрольного сигналу ВСКК в ближній зоні.

**Практична значимість отриманих результатів.** Теоретичні положення, які розвинені в роботі, та отримані математичні моделі складають необхідну теоретичну базу для розробки нових і розширення функціональних можливостей існуючих автоматизованих вимірювальних комплексів (АВК) та ВСКК ФАР. Практична цінність отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що:

1. Теоретично та експериментально доведена можливість налаштування багатоканальних ФАР з обмеженим числом регульованих елементів.
2. Результати проведеного аналізу методів контролю й виміру параметрів ФАР і пропозиції по підвищенню їхньої точності й інформативності дозволяють обґрунтовано вибрати методи налаштування та КТС для конкретних типів ФАР та забезпечити їх апаратну і програмну реалізацію.
3. Показана можливість зниження рівня сумарного сигналу на 25÷40 дБ і зменшення похибок визначення ККПК ФАР за рахунок раціонального вибору місць розташування випромінювачів контрольного сигналу в ближній зоні.
4. Розроблені алгоритми й програми моделювання ФАР, вимірювання й обробки даних для визначення ККПК доцільно використовувати при:
  - розробці технічних завдань і вимог на ФАР та АВК для їх настройки;
  - обґрунтуванні умов проведення вимірювань та КТС ФАР, виборі вимірювальної апаратури АВК та ВСКК;
  - розробці апаратури, конструкції винесених нерухомих випромінювачів контрольних сигналів та алгоритмів функціонування ВСКК.

Результати досліджень були використані при створенні ряду АВК, що впроваджені на ряді промислових підприємств України (НДІ «КВАНТ», КЕМЗ «Іскра», ВАТ "Укрспецтехніка") і Росії (ВАТ "Тайфун", м. Калуга) та використані при проведенні виміру параметрів і КТС виробу Sea Lion, контейнерів 6АС1 виробу "1Л220У", блоків 4ПМ1.1.1 виробу "Позитив".

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, що викладені у дисертації, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в спільних роботах полягає в наступному: в роботах [11, 12] здобувачу належить розробка методики та алгоритмів налаштування багатоканальних ФАР з обмеженим числом регульованих елементів і проведення їх експериментального підтвердження при налагодженні виробів 6АС1; в роботах [2, 6-10, 21] здобувач запропонував методику і технологію настройки ФАР і обґрунтував можливість розрахунку фазових поправок по секторах відхилення променя, що враховують вплив зміни взаємних зв'язків випромінювачів на ДС при ширококутнім скануванні; в роботах [3-5, 15, 19, 20] здобувачу належать: розробка математичної моделі ФАР, що, на відміну від існуючих, враховує нелінійні властивості амплітудно-фазових характеристик фазообертачів при зміні їх стану, алгоритми та рівняння, що дозволяють отримати незміщену оцінку ККПК при проведенні КТС; в роботах [18, 22] здобувачем розроблені імітаційно-моделюючий комплекс та

програмне забезпечення для розрахунків, моделювання і аналізу процесу вимірювання характеристик ФАР, вибору місць розташування випромінювачів контрольного сигналу ВСКК в ближній зоні; в роботах [13, 17, 18] здобувачем запропонований комбінований метод визначення параметрів відхилених променів ФАР який в якості початкової оцінки використовує отримані за допомогою АВК наближені дані про амплітудно-фазовий розподіл та напрямок головного максимуму ДС.

Таким чином, із сумісних публікацій в дисертації використані тільки ті матеріали, у яких є вагомий внесок автора, включаючи: обґрунтування й постановку завдань теоретичних і експериментальних досліджень; розробку методології, апаратури, математичних моделей і обчислювальних алгоритмів; обробку результатів досліджень, їх фізичну інтерпретацію й узагальнення; формулювання висновків і практичних рекомендацій. Співавтори брали участь у розробці програмного забезпечення і обговоренні методології та результатів досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації були представлені й обговорені на 19 міжнародних конференціях та форумах, зокрема 2-nd Int. Conf. of Antenna Theory and Techniques. Kyiv, 1997; III Міжнародна НТК “Антенно-фидерные устройства, системы и средства радиосвязи”. Воронеж, 1997; Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkov, 1998; Int. Conf. of Antenna Measurement Techniques Association (AMTA) - USA (2003, 2004); Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ'04). Dnepropetrovsk, 2004; 15th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2004. Warsaw (Poland); 5-th Int. Conf. of Antenna Theory and Techniques. Kyiv, 2005; 2-я та 3-я Міжнародні НПК “Військова освіта та наука: Сьогодення та майбутнє”. – ВІКНУ. Київ, 2005; 5-а наук.-техн. конф. “Удосконалення системи й засобів метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки”. Харків, 2005; 6-th Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, 2007; III-й Міжнародний радіоелектронний форум (МРФ-2008). Харків, 2008; 16<sup>th</sup>, 18<sup>th</sup>, 20<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication technology” (Sevastopol, 2006, 2008, 2010), V Всеросійська конференція “Радиолокация і зв'язок”. Москва, 2011 р.

**Публікації.** Основні результати дисертації досить повно відображені у 22 публікаціях, зокрема у 10 статтях у фахових виданнях, що входять до переліку ВАК, 2 статті опубліковано у фахових закордонних виданнях, в 9 працях міжнародних науково-технічних конференцій, 1 міжнародного форуму та 4 звітах з НДР і ДКР.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Повний обсяг роботи – 166 стор. Усього в дисертації 57 рисунків, 2 таблиці. Список використаних літературних джерел нараховує 182 найменувань, додатки включають 4 акта впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі до дисертації – розкрито сутність і стан науково-технічної задачі, подано обґрунтування актуальності теми дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, показано взаємозв'язок проведених у дисертації досліджень з науковими програмами і темами, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано основні задачі дослідження та методи їх розв'язання, викладено основні результати досліджень, які мають наукову новизну і практичне значення, наведено можливі галузі їхнього застосування. Приведено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів роботи і про їх впровадження. Наведено структуру й обсяг дисертації та коротку анотацію розділів роботи.

У першому розділі проведено аналітичний огляд науково-технічної інформації за темою досліджень.

Визначені особливості ФАР як об'єктів дослідження й наявні методи, що застосовуються для вимірювань їхніх параметрів. Проведено аналіз методів, що використовуються для контролю технічного стану й визначення параметрів ФАР.

Розглянуті особливості апаратної реалізації існуючих автоматизованих вимірювальних комплексів та їх програмного забезпечення для проведення КТС та настроювання ФАР, виявлені достоїнства й недоліки відомих рішень.

Обґрунтоване використання статистичного підходу до оцінки технічного стану ФАР під час проведення приймально-здавальних випробувань і КТС під час експлуатації. Відзначено, що найбільш перспективними методами для настроювання, вимірювання параметрів та проведення приймально-здавальних іспитів ФАР є комутаційний та ампліфазометричний методи, для проведення КТС та калібрування ФАР у процесі експлуатації - комутаційний метод, а для оперативного інтегрального контролю - динамічний метод.

Визначено коло невирішених питань, складений перелік актуальних задач і визначені актуальні напрямки дисертаційних досліджень.

У другому розділі розглянуто низку питань, пов'язаних із аналізом методів настроювання ФАР.

**Оптимізація характеристик багатоканальних ФАР при настроюванні.** Запропоновано метод і алгоритм настроювання багатоканальних ФАР, у яких для настроювання можуть бути використані тільки фазообертачі, загальні для всіх каналів (див. рис. 1). Метод об'єднує процеси виміру АФР на апертурі ФАР та оперативну перевірку впливу розрахованих фазових поправок (ФП) на параметри всієї групи каналів шляхом математичного моделювання. Це дозволило практично повністю усунути помилки просторової орієнтації рівносигнального напрямку (РСН), забезпечило вирівнювання коефіцієнтів спрямованої дії (КСД) у прийомних каналах, істотно скоротило час і підвищило якість настроювання, забезпечуючи зменшення рівня бічних пелюстків (РБП) у каналі з найбільшими помилками реалізації АФР за рахунок деякого підвищення РБП у каналах діаграмоутворюючих схемам (ДУС) ФАР з меншими помилками.



В роботі розглядається ФАР, що складається з  $M \times N$  випромінюючих елементів, розташованих у вузлах прямокутної координатної сітки із кроком  $d_x, d_y$ , і ДУС, що формує один передавальний промінь й  $L-1$  приймальних променів, розведених у просторі на задані кути від РСН. Формування ДС парціальних променів із заданим РБП у режимах ПРИЙОМ і ПЕРЕДАЧА (багатопроменевої матриці) виконується приймально-передавальними модулями (ППМ) з фазообертачами спільними для всіх ДС та ДУС.

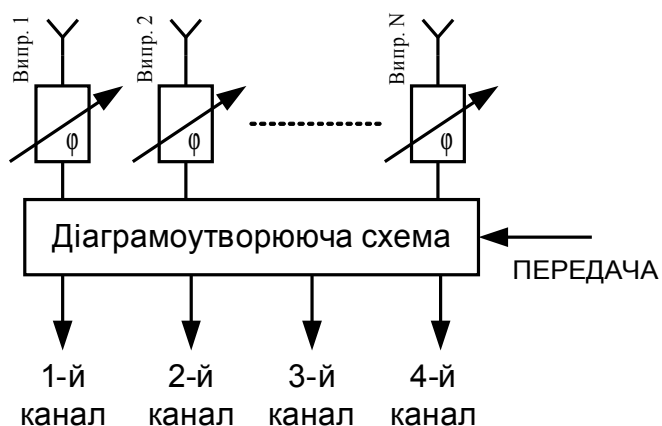


Рис. 1. Багатоканальна лінійна ФАР

Для одержання низького інтегрального РБП ДС у заданих секторах амплітудні й фазові помилки реалізації АФР можна зменшити шляхом їхньої компенсації за допомогою індивідуальних атенюаторів і фазообертачів в каналах ДУС. Однак введення в конструкцію ДУС великої кількості регулювальних елементів приводить до росту ваги та розмірів ФАР, появи додаткових

втрат у ДУС, підвищенню енергоспоживання, зниженню надійності й виникненню проблем забезпечення доступу до блоків для заміни елементів. При наявності у ППМ тільки одного керованого фазообертача (ФО) на елемент ФАР, загального для всіх каналів, спотворення АФР, внесені ДУС, принципово не можуть бути повністю компенсовані для всіх каналів ФАР і треба шукати компромісні рішення, що дозволяють одержати прийнятні характеристики ФАР за допомогою єдиного набору фіксованих фазових поправок (ФП), загальних для всіх каналів, що заносяться в систему керування променем (СКП).

Таким чином, алгоритм розрахунку ФП повинен забезпечувати заданий РБП, установку РСН і задане просторове розведення променів за умови, що матриця ФП є загальною для всіх каналів ФАР, а дисперсії помилок реалізації АФР у каналах у загальному випадку різні. Було розроблено та експериментально досліджено декілька варіантів алгоритмів розрахунку ФП.

Вихідними даними для розрахунку ФП є набір АФР  $\dot{A}_{m,n}^{\ell}$  на випромінювачах, для  $L$  каналів ФАР ( $\ell = \overline{1, L}$ ), отриманий експериментально.

АФР  $\dot{A}_{m,n}^{\ell}$  на випромінювачах кожного з  $L$  каналів багатопроменевої матриці відрізняється від теоретичного розподілу  $\dot{T}_{m,n}^{\ell}$  через помилки реалізації, що включають дві складові – одна складова визначається помилками ФО ППМ, які є загальними для всіх каналів, інша залежить від індивідуальних помилок реалізації АФР в  $\ell$ -тому каналі ДУС. Процес настроювання починається із запису в СКП ФАР початкового стану всіх ФО  $\psi_{m,n}^0 = 0$  ( $m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N}$ ).

Первинним завданням настроювання є виділення з  $L$  вимірних масивів АФР загальної частини  $\dot{P}_{m,n}^k$ , а вторинним — компенсація відхилень у ньому від

заданого за допомогою дискретних ФО. Алгоритм настроювання ФАР забезпечує знаходження  $\dot{P}_{m,n}^k$  для поточної  $k$ -ої ітерації й розрахунок ітераційним методом ФП  $\psi_{m,n}^{(k+1)}$ , додаткових до занесених у СКП. Для виділення  $\dot{P}_{m,n}^k$  із  $L$   $\dot{A}_{m,n}^k$  всі масиви  $\dot{A}_{m,n}^k$  зводяться до одного напрямку в просторі:  $u^k = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L u^{\ell,k}$ ,  $v^k = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L v^{\ell,k}$ , де  $u^{\ell,k} = \sin \theta_{\max}^{\ell,k} \cos \varphi_{\max}^{\ell,k}$  та  $v^{\ell,k} = \sin \theta_{\max}^{\ell,k} \sin \varphi_{\max}^{\ell,k}$ ; напрямні косинуси парціальних променів,  $\theta_{\max}^{\ell,k}$ ,  $\varphi_{\max}^{\ell,k}$  напрямки максимуму променя  $\ell$ -го каналу в просторі після  $k$ -ої ітерації.

Для виділення  $\dot{P}_{m,n}^k$  з  $L$  вимірних масивів АФР виконується компенсація  $\dot{T}_{m,n}^{\ell}$  в кожному каналі та проводиться нормування й компенсується теоретичне «розведення» променів відносно РСН:

$$\dot{F}_{m,n}^{\ell,k} = \dot{A}_{m,n}^{\ell,k} / \dot{T}_{m,n}^{\ell} r^{\ell,k}, \quad (1)$$

де  $\dot{F}_{m,n}^{\ell,k} = \dot{P}_{m,n}^k + \dot{G}_{m,n}^{\ell,k}$  - нормалізоване АФР  $\ell$ -го каналу (зведене до середнього РСН);  $\dot{T}_{m,n}^{\ell} = T_{m,n}^{\ell} e^{j\varphi_{m,n}^{\ell}}$ ;  $T_{m,n}^{\ell}$  - теоретичний амплітудний розподіл (АР);  $\varphi_{m,n}^{\ell} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ d_x \Delta u^{\ell} \left( m - \frac{M+1}{2} \right) + d_y \Delta v^{\ell} \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \right]$  - фазовий розподіл (ФР) в  $\ell$ -тому каналі;  $\dot{G}_{m,n}^{\ell,k}$  - комплексний масив, що несе інформацію про індивідуальні відмінності реалізації АФР в каналах;  $\Delta u^{\ell}$  і  $\Delta v^{\ell}$  - задані напрямні косинуси парціальних променів відносно РСН;  $r^{\ell,k} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left| \dot{A}_{m,n}^{\ell,k} / \dot{T}_{m,n}^{\ell} \right|^2}$ .

Ціль першого етапу знаходження ФП полягає в знаходженні такої загальної частини АФР  $\dot{P}_{m,n}^k$ , яка б мінімізувала й «вирівнювала» відхилення АФР  $\dot{G}_{m,n}^{\ell,k}$  від  $\dot{P}_{m,n}^k$ , тобто забезпечувала б рівні «відстані» між  $\dot{F}_{m,n}^{\ell,k}$  й  $\dot{P}_{m,n}^k$ . Це приводить до «однакових» (у статистичному змісті) помилок АФР у каналах ФАР й однаковому РБП. Визначимо «відстань»  $\rho_{\ell}^k$  між поточним наближенням до загальної частини АФР  $\dot{P}_{m,n}^k$  й  $\ell$ -м розподілом  $\dot{F}_{m,n}^{\ell,k}$  для кожного з  $L$  каналів як

$$\rho_{\ell}^k = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left| \dot{P}_{m,n}^k - q_{\ell}^k \dot{F}_{m,n}^{\ell,k} \right|^2}, \quad (2)$$

де  $q_{\ell}^k$  - коефіцієнти приведення, що дозволяють мінімізувати величини  $\rho_{\ell}^k$ . Мінімальне значення величини  $\rho_{\ell}^k$  забезпечується при виконанні умови  $\partial \rho_{\ell}^k / \partial q_{\ell}^k = 0$ , з чого випливає  $q_{\ell}^k = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ \dot{P}_{m,n}^k \left( \dot{F}_{m,n}^{\ell,k} \right)^* + \left( \dot{P}_{m,n}^k \right)^* \dot{F}_{m,n}^{\ell,k} \right]$ . (3)

Підставляючи вираз (3) в (2) і, враховуючи що  $\left\| \dot{F}_{m,n}^{\ell,k} \right\| = 1$ , одержимо

$$\rho_{\ell}^k = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left| \dot{P}_{m,n}^k \right|^2 - \left( q_{\ell}^k \right)^2}. \quad (4)$$

Загальну частину  $\dot{P}_{m,n}^k$  подамо у вигляді лінійних комбінацій  $\dot{F}_{m,n}^{s,k}$

$$\dot{P}_{m,n}^k = \sum_{s=1}^L \mu_s^k \dot{F}_{m,n}^{s,k}. \quad (5)$$

За умов  $q_1^k = q_2^k = \dots = q_L^k = q^k$  отримаємо

$$q_\ell^k = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^L \mu_s^k \left[ \dot{F}_{m,n}^{s,k} (\dot{F}_{m,n}^{\ell,k})^* + (\dot{F}_{m,n}^{s,k})^* \dot{F}_{m,n}^{\ell,k} \right]. \quad (6)$$

Позначивши  $a_{\ell,s}^k = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ (\dot{F}_{m,n}^{\ell,k})^* \dot{F}_{m,n}^{s,k} + \dot{F}_{m,n}^{\ell,k} (\dot{F}_{m,n}^{s,k})^* \right]$ , одержимо систему лінійних

$$\text{рівнянь відносно } \mu_s : q_\ell^k = \sum_{s=1}^L \mu_s^k a_{\ell,s}^k. \quad (7)$$

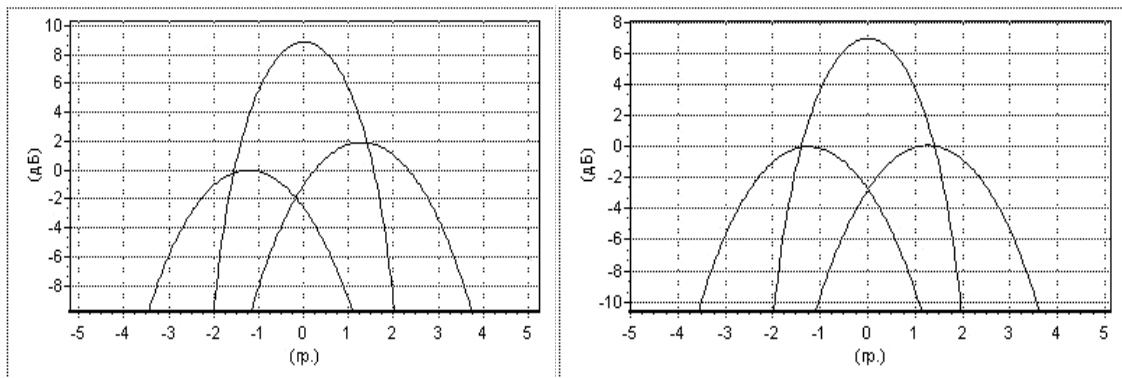
Вирішуючи систему (7) методом обертання матриці  $(a_{\ell,s}^k)$ , одержуємо

$$\mu_s^k = q^k \sum_{\ell=1}^L b_{s,\ell}^k = q^k \cdot d_s^k, \text{ де } d_s^k = \sum_{\ell=1}^L b_{s,\ell}^k, b_{s,\ell}^k - \text{елементи матриці } (a_{\ell,s}^k)^{-1}.$$

Знайдені значення  $\mu_s^k$  дозволяють із урахуванням виразу (5) одержати  $\dot{P}_{m,n}^k = q^k \sum_{s=1}^L d_s^k \cdot \dot{F}_{m,n}^{s,k}$  з точністю до несуттєвої постійної складової  $q^k$ .

Розраховуються ФП  $\psi_{m,n}^{k+1}$ , які додаються до ФП, раніше записаних у СКП  $\psi_{m,n}^{k+1} = E \left[ 0,5 + 2\pi - \arg(\dot{P}_{m,n}^k) / \Delta \right]$ , де  $\Delta = 2\pi / 2^t$ ,  $t$  – розрядність ФО;  $E$  – оператор виділення цілої частини. Ітераційний процес закінчується, коли всі  $\psi_{m,n}^K = 0$ , де  $K$  – кількість ітерацій, що дорівнює числу циклів вимірювання АФР на апертурі ФАР. Остаточні значення ФП рівні  $\psi_{m,n} = \sum_{k=0}^K \psi_{m,n}^k$ .

В якості приклада на рис. 2, 3 наведені результати моделювання з використанням вищеописаного алгоритму. У модель ДУС ФАР були внесені початкові випадкові фазові помилки із середньоквадратичними відхиленнями в каналах, рівними, відповідно  $\sigma_1 = 53^\circ$ ,  $\sigma_2 = 27^\circ$ ,  $\sigma_3 = 18^\circ$ ,  $\sigma_4 = 13^\circ$ ,  $\sigma_5 = 11^\circ$ . Вирівнювання відстаней  $\rho_\ell^k$  приводить до істотного підвищення якості настроювання ФАР і забезпечує вирівнювання амплітудних характеристик каналів та установку РСН (див. рис. 2), а також з приблизно рівний (у статистичному змісті) РБП у всіх прийомних каналах (див. рис. 3).



а) - до настроювання

б) - після настроювання

Рис. 2. Вирівнювання амплітудних характеристик каналів та установка РСН

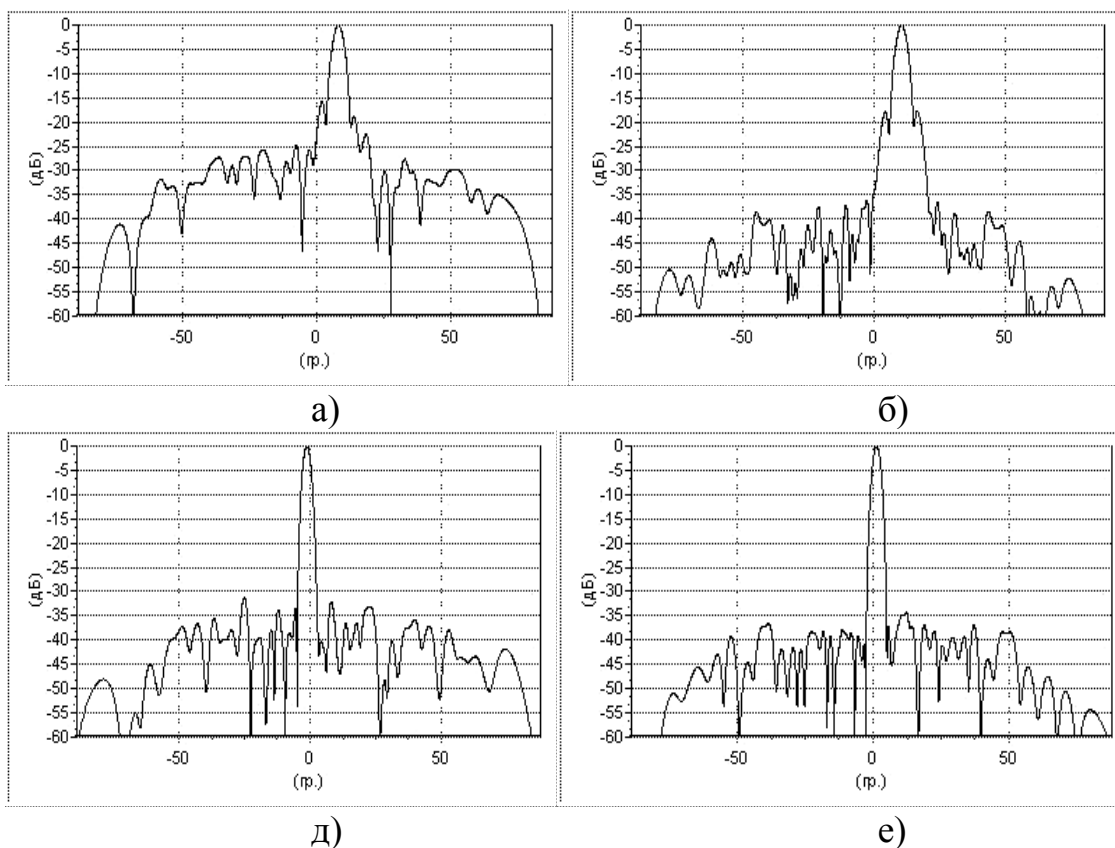


Рис. 3. Вирівнювання РБП у ДС двох прийомних каналах ФАР з найбільшими й найменшими значеннями фазових помилок (канали 1 й 4). Рис 3а, б - ДС каналів до настроювання; рис 3д, е) - ДС каналів після настроювання

**Комбінований метод виміру параметрів ФАР.** Критичними факторами з погляду одержання необхідної точності визначення АФР є помилки виміру фазових розподілів (ФР), внесені механічними сканерами, особливо при зміні температури за час виміру, а також технічні характеристики вимірювальної апаратури. Тому для підвищення точності визначення параметрів ФАР був запропонований і експериментально відпрацьований комбінований метод виміру параметрів антен, що поєднує елементи апертурно-зондового (АЗМ) й амплітудного методів (АМ).

Суть АМ складається у визначенні характеристик антен за результатами виміру амплітудних розподілів  $|\dot{E}_{S1}|$ ,  $|\dot{E}_{S2}|$  на двох поверхнях  $S_1$  і  $S_2$  поблизу антени й використанні апріорної інформації про антену.

Спочатку вибирається деяке початкове фазове наближення  $\varphi_{S1}^{(1)}$  до вимірів амплітуди  $|\dot{E}_{S1}|$  на поверхні  $S_1$ . Поле  $|\dot{E}_{S1}|e^{j\varphi_{S1}^{(1)}}$  перераховують по відомих алгоритмах на поверхню  $S_2$ :

$$|\dot{A}_2|^{(1)} e^{j\varphi_{S2}^{(1)}} = G \left\{ |\dot{E}_{S1}| e^{j\varphi_{S1}^{(1)}} \right\},$$

де  $G$  — деяке лінійне перетворення, що переводить поле  $\dot{E}_{S1}$  в поле на  $S_2$ .

Фазу поля  $\varphi_{S2}^{(1)}$  приймають як початкове наближення фазового розподілу поля  $\dot{E}_{S2}$ , амплітуду якого виміряли на  $S_2$ . Далі поле  $|\dot{E}_{S2}|e^{j\varphi_{S2}^{(1)}}$  перераховують на  $S_1$ :

$$|\dot{A}_1|^{(1)} e^{j\varphi_{S1}^{(2)}} = G^{-1} \left\{ |\dot{E}_{S2}| e^{j\varphi_{S2}^{(1)}} \right\},$$

де  $G^{-1}$  – перетворення, зворотне  $G$ . Вид перетворень  $G$  і  $G^{-1}$  визначається типом поверхні сканування.

Отриманий фазовий розподіл  $\varphi_{S_1}^{(2)}$  використовується як наступне наближення фази на  $S_1$  й т.д. Далі процес циклічно повторюється, при цьому в кожному циклі перебуває величина нев'язки. У якості нев'язки використана норма відмінності ітераційних функцій  $|\dot{A}_1|^{(k)}$ ,  $|\dot{A}_2|^{(k)}$  від обмірюваних амплітудних розподілів  $|\dot{E}_{S_1}|$ ,  $|\dot{E}_{S_2}|$  у будь який метриці:  $\delta_k = \left\| |\dot{A}_1|^{(k)} - |\dot{E}_{S_1}|, |\dot{A}_2|^{(k)} - |\dot{E}_{S_2}| \right\|$ , де  $\delta_k$  – величина нев'язки, котра характеризує ступінь відмінності обмірюваних і знайдених у результаті  $k$ -й ітерації амплітудних розподілів на  $S_1, S_2$ .

Ітераційний процес закінчується при виконанні умов  $\delta_k \leq \varepsilon$ , де величина  $\varepsilon$  повинна враховувати точність вимірів  $|\dot{E}_{S_1}|$ ,  $|\dot{E}_{S_2}|$ .

Суть комбінованого методу полягає в тім, що вперше запропоновано в якості початкового наближення  $\varphi_{S_1}^{(1)}$  для відхилених променів ФАР використовувати фазовий розподіл, отриманий АЗМ експериментально. Комбінований метод істотно полегшує отримання достовірної ДС при досить помірних вимогах до точності вимірів фази поля на вимірювальній поверхні.

**Настройка ФАР при ширококутнім скануванні.** При проведенні настройки ФАР необхідно враховувати залежність АФР на апертурі від зміни взаємного зв'язку випромінювачів (ВЗВ) при ширококутному скануванні і залежність ДС випромінювачів від їх координат в апертурі ФАР. Для алгоритмічної компенсації цих факторів при проведенні настроювання запропоновано виміряти параметри ДС для ряду кутових напрямів на кожній з робочих частот і розрахувати відповідні поправки для корекції АФР на апертурі, що приводить до необхідності розбиття повного сектора сканування на ряд секторів і введення для них різних ФП. При настроюванні ФАР виробу "Sea Lion" це дало змогу виконати вимоги технічного завдання у повному секторі сканування, відповідно знизивши РБП на 4-7 дБ та зменшити похибки орієнтації відхилених променів у просторі з 20 до 3-х кутових хвилин.

Надані експериментально апробовані пропозиції по значному зменшенню часу (до 70-90%) при проведенні настроювання ФАР 4ПМ1.1.1 з одномірним скануванням у вертикальній площині за рахунок використання скороченого обсягу вимірів АФР (розмір матриці - 6x98, замість типового для цього приладу - 98x98) для виконання перших ітерацій для розрахунку ФП у процесі настройки.

**У третьому розділі** розглянуті питання контролю технічного стану ФАР в процесі виготовлення, або експлуатації.

**Контроль технічного стану ФАР.** Поступова зміна параметрів ППМ, ДУС і НВЧ-трактів внаслідок старіння, зміни температурного режиму або напруги джерел живлення призводить до погіршення технічних характеристик ФАР (зростанню РБП, падінню КСД і зниженню точності установки положення променя в просторі).

З метою своєчасного виявлення виникаючих змін, усунення несправностей або компенсації їх впливу на параметри ФАР необхідно періодично проводити КТС вузлів, що входять в ППМ. Складність завдання обумовлена розміщенням ФАР на об'єкті і відсутністю можливості проведення прямих вимірів параметрів ППМ та ДУС. Звичайно при проведенні КТС для кожної робочої частоти послідовно змінюють стан фазообертача тільки одного ППМ в режимі ПРИЙОМ (або ПЕРЕДАЧА для активних ФАР) і реєструють сигнал:

$$\dot{V}_{m\ell} = \dot{V}_{\Sigma} + \dot{K}_m \dot{E}_{m\ell} + \Delta \dot{V}_{m\ell},$$

де  $\dot{V}_{\Sigma}$  – сумарний сигнал, що створюється неконтрольованими ППМ;  $\dot{E}_{m\ell}$  – амплітуда і фаза сигналу ППМ, що контролюється, при включенні  $\ell$ -го дискрету ФО, де  $\ell = \overline{0, L-1}$ ;  $L$  – можливе число станів ФО,  $L = 2^p$ , де  $p$  - число розрядів ФО;  $\dot{K}_m$  - комплексний коефіцієнт передачі між випромінювачем контрольного сигналу (ВКС) і випромінювачем каналу, що контролюється, який вважається відомим за результатами настройки ФАР у стендовому залі);  $m$  - номер ППМ,  $m = \overline{1, M}$ ;  $\Delta \dot{V}_{m\ell}$  – нев'язка вимірів.

Для визначення параметрів контрольованого каналу при обробці результатів вимірювання треба визначити  $\dot{E}_{m\ell} = E_{m\ell} \cdot e^{j\varphi_{m\ell}}$  із зареєстрованого сигналу  $\dot{V}_{m\ell}$ .

У розділі запропоновані нові алгоритми обробки результатів вимірювань, які обумовлені конкретною апаратною реалізацією контрольованої ФАР. Залежно від паспортних даних ФО, наведених виробником, або попередніх індивідуальних вимірів параметрів ППМ і вимог, що пред'являються до точності визначення ККПК, детальності і часу проведення КТС, робиться вибір методології проведення вимірів і алгоритмів обробки даних. У дисертації наводяться різні умови проведення КТС, рекомендації по застосуванню розроблених алгоритмів обробки отриманих даних та наведено часові характеристики проведення вимірів для КТС ФАР в режимах **робота на прийом** та **робота на передачу**.

Так у найскладнішому випадку КТС при наявності великих помилок реалізації заданих фазових зсувів, можливих відмов дискретів ФО ППМ та сильної залежності амплітуди сигналу в контрольованім каналі від стану ФО (різниця у ослабленні, що вноситься при переключенні дискретів, більше 1 дБ) слід використовувати алгоритм обробки результатів КТС, що знімає існуюче обмеження в частині гіпотези про незмінність амплітуди сигналу в контрольованому каналі при перемиканні дискретів ФО. В цьому випадку слід використовувати апріорну інформацію про втрати, що вносяться при переключенні дискретів кожного конкретного ФО встановленого в ППМ.

В цьому випадку алгоритм розрахунку комплексного коефіцієнта передачі (ККП) ППМ застосовує ітераційний процес обчислення  $\dot{A}_{\ell} = \dot{P}_0 + \dot{\rho}_0 \dot{q}_{\ell}$ , де:

$\dot{A}_{\ell}$  - результат вимірів (амплітуда і фаза) комплексного коефіцієнта передачі між випромінюючим елементом ППМ ФАР і ВКС  $|\dot{A}_{\ell}| = \sqrt{A_{\ell\sin}^2 + A_{\ell\cos}^2}$ ,  $\varphi_{\ell} = \arctg(A_{\ell\sin}/A_{\ell\cos})$ , де  $\dot{P}_0$  - сумарний сигнал усіх неконтрольованих каналів (комплексна підставка);  $\dot{\rho}_0 \dot{q}_{\ell}$  - сигнал контрольованого каналу при  $\ell$ -м стані ФО,

для якого вимірюється  $\dot{A}_\ell$ ;  $\dot{\rho}_0 = \dot{A}_0 - \dot{P}_0$  комплексний множник, що погоджує фазу і амплітуду контрольованого ФО при  $\ell = 0$  и  $|\dot{q}_\ell| = 1$ ;  $\dot{q}_\ell$  - значення ККП ФО контрольованого ППМ,  $|\dot{q}_\ell| = q_1 \dots q_{N-1}$  - значення модулів втрат, що вносяться, на робочих частотах при зміні станів ФО відносно нульового дискрету ФО  $|\dot{q}_0|$ . Величини  $|\dot{q}_\ell|$  відомі з паспортів або протоколів вхідного контролю ФО.

Процес визначення  $\dot{q}_\ell^k$  є ітераційним, де  $k$  - номер ітерації. Номер ітерації послідовно набуває значень 0, 1, 2...K. Ітераційна оцінка величини  $\dot{P}_0^k$  за наявності помилок вимірів  $\dot{\delta}_\ell$  повинна забезпечити мінімум відхилень оцінок  $\dot{A}_\ell^k$  від реальних значень  $\dot{A}_\ell$  для усіх станів ФО ППМ в яких вимірюється  $\dot{A}_\ell$ :

$$\dot{A}_\ell - \dot{A}_0 \dot{q}_\ell - \dot{P}_0 (1 - \dot{q}_\ell) = \dot{\delta}_\ell, \quad \sum_{\ell=0}^{L-1} |\dot{\delta}_\ell|^2 = \sum_{\ell=0}^{L-1} |\dot{A}_\ell - \dot{A}_0 \dot{q}_\ell - \dot{P}_0 (1 - \dot{q}_\ell)|^2 \rightarrow \min.$$

Ітераційний процес починається з розрахунку  $\dot{q}_\ell^0 = |\dot{q}_\ell| e^{j\varphi_\ell^0}$ . Для вибору початкового наближення можна використовувати  $\varphi_\ell^0 = \frac{2\pi \ell}{L}$  (початкове наближення реалізації заданих фазових з), потім розрахунок ведеться по формулах:

$$\dot{P}_0^{k+1} = \frac{\sum_{\ell=0}^{L-1} (\dot{A}_\ell - \dot{A}_0 \dot{q}_\ell^k) (1 - \dot{q}_\ell^k)^*}{\sum_{\ell=0}^{L-1} |1 - \dot{q}_\ell^k|^2}, \quad e^{j\varphi_\ell^{k+1}} = \frac{\dot{A}_\ell - \dot{P}_0^k}{(\dot{A}_0 - \dot{P}_0^k) |\dot{q}_\ell^k|}, \quad \dot{q}_\ell^k = |\dot{q}_\ell| e^{j\varphi_\ell^k}.$$

Ітераційний процес закінчується при  $|\dot{P}_0^{k+1} - \dot{P}_0^k| \leq \varepsilon$ , ( $\varepsilon \approx 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-13}$ ).

**Розташування випромінювачів контрольованого сигналу.** Виконана розробка імітаційно-моделюючого комплексу та його програмного забезпечення для розрахунків, моделювання і аналізу характеристик ФАР та вибору місць розташування випромінювачів контрольованого сигналу в ближній зоні. Це дозволило знизити рівень сумарного сигналу на 25÷40 дБ і підвищити якість визначення ККПК ФАР. Розроблена методика та апаратура для прецизійного виміру нормуючих коефіцієнтів, проведені натурні випробування.

**У четвертому розділі** приведені основні технічні характеристики, а також результати експериментальних і метрологічних досліджень розроблених АВК. Наведено результати моделювання, експериментального відпрацювання задач, розглянутих у розділах 2-3. Приведені результати розробки методичного, апаратного (див. рис. 4) та програмного забезпечення АВК і ВСКК для проведення КТС та визначення характеристик ФАР.

АВК забезпечує розрахунок інтегральних характеристик ФАР - об'ємних амплітудних, фазових, поляризаційних і динамічних діаграм спрямованості ФАР, пеленгаційних характеристик, КСД; визначення параметрів ДС ФАР (ширину і координати головного променя, рівні і координати бічних пелюсток, інтегральний рівень фону в заданому секторі, крутизну ПХ та ін.). Був проведений КТС й настройка експериментальних та серійних зразків антенних пристроїв: контейнерів 6АС1 виробу 1Л220У, 4ПМ1.1.1 («Позитив»), РЛС «Sea Lion». Результати проведених експериментальних випробувань дали змогу виявити критичні

фактори, що впливають на ефективність процесів КТС та настройки. Це дозволило розробити алгоритми методики та алгоритми їх врахування і підвищити якість вимірювань при експлуатації АВК.

а)

б)

в)

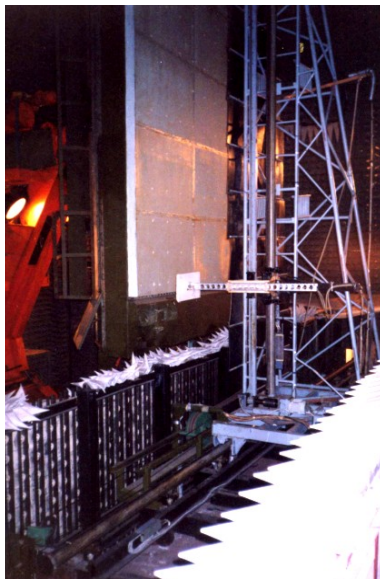
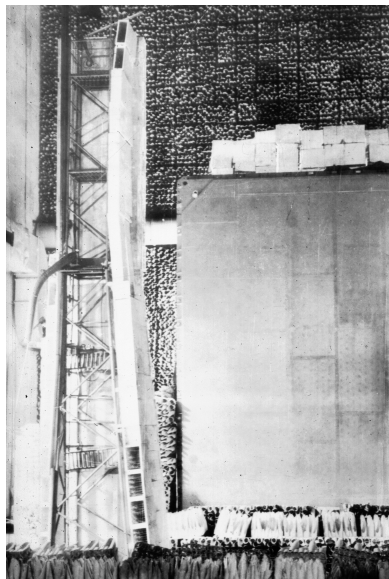


Рис. 4. Приклади створених АВК: а) – АВК "ИКАР-4", б) - "АВК-ПКЧ", в) – АВК "БП-УСТ"

Наведені результати ітераційного процесу настроювання ФАР. На рис. 5а показаний основний переріз ДС у кутомісній площині відразу після виготовлення ФАР. Наявність різниць ККПК, обумовлених відмінністю електричних довжин каналів із-за похибок виготовлення, розкидом початкових фазових зсувів у трактах ДУС і ППМ, привели до значного відхилення характеристик ФАР від закладених теоретично. Зокрема, напрям головного максимуму відхилений від нормалі більш ніж на  $5^\circ$ , РБП порядку мінус 20 дБ замість теоретичного мінус 35 дБ. На рис. 5 б приведені ДС після внесення ФП, отриманих при першій ітерації. З порівняння ДС на рис. 5а і 5б видно, що промінь вже на першій ітерації встановлений в задане положення (по нормалі до апертури), а РБП зменшився до мінус 27,5 дБ. На рис. 5в приведений результат 4-ої ітерації. Максимальний РБП близький до розрахункового і складає мінус 33 дБ. Подальші ітерації практично не позначаються на РБП. Форму представлення об'ємної ДС наведено на рис. 5 г.

Наведені результати розробки методики настроювання ФАР для урахування впливу зміни взаємних зв'язків випромінювачів на діаграму спрямованості (ДС) при ширококутнім скануванні та надані пропозиції щодо зменшення часу на проведення настроювання ФАР з одномірним скануванням у вертикальній площині.



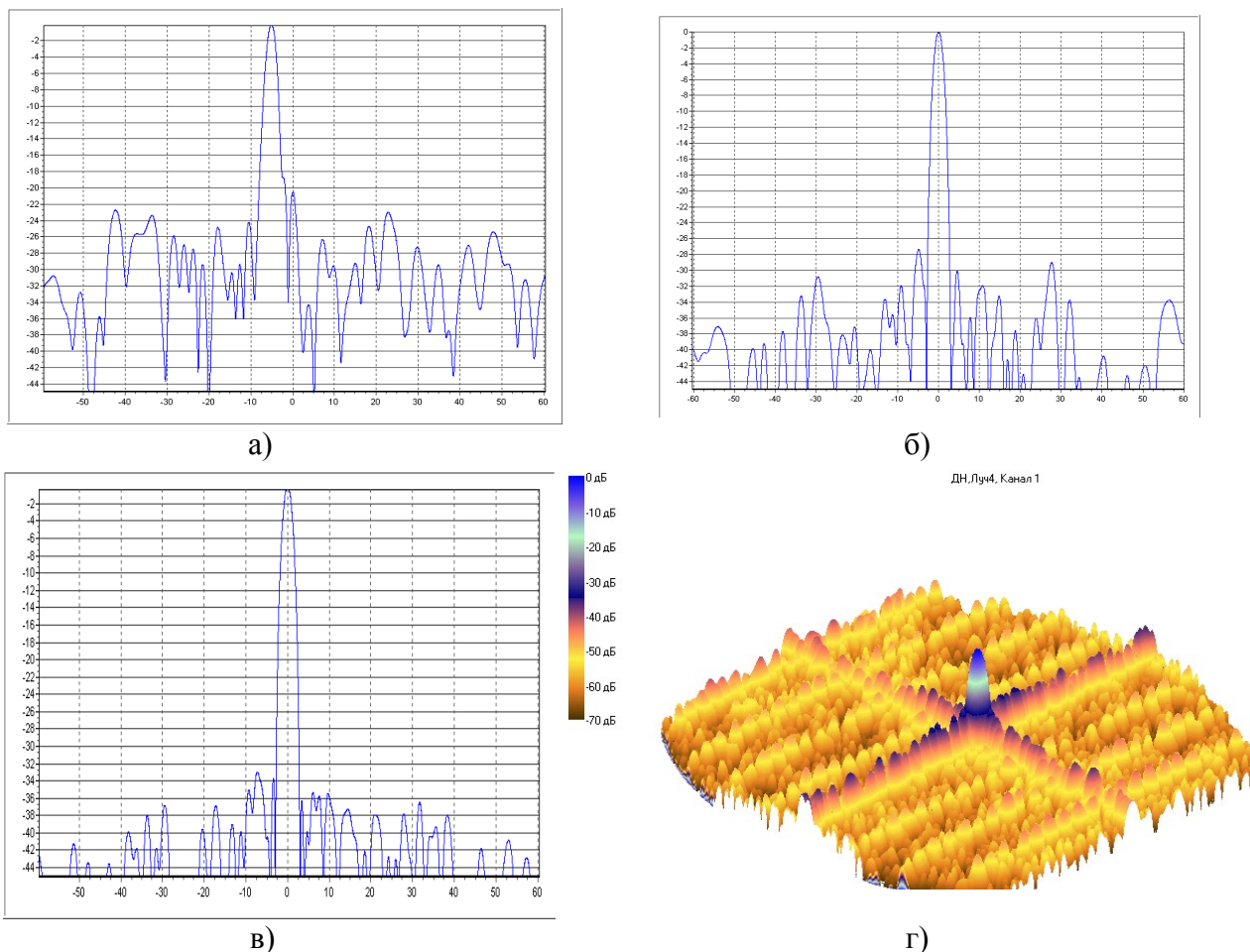


Рис. 5. Результати ітераційного процесу настроювання ФАР

Результати досліджень виявили відставання метрологічного забезпечення вимірювань від практичних потреб і відсутність сучасних ДСТУ. На основі проведених експериментальних робіт і математичного моделювання розроблені методики по оцінці похибок отриманих результатів та внесені пропозиції до Держстандарту України по створенню технічного комітету "Антенні спеціальні" для розробки відповідних ДСТУ.

## ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційних досліджень вирішено актуальну науково-прикладну задачу удосконалення техніки і технології проведення КТС та антенних вимірювань, що дало можливість створення автоматизованих вимірювальних комплексів нового покоління.

Основні наукові й практичні результати дисертації полягають у наступному:

1. Уперше запропонована методика і алгоритми настроювання багатоканальних ФАР у яких для настроювання можуть бути використані тільки фазообертачі, загальні для всіх каналів.
2. Уперше запропонований комбінований метод визначення параметрів відхилених променів ФАР.
3. Вдосконалена методика настроювання ФАР для урахування впливу зміни

взаємних зв'язків випромінювачів на діаграму спрямованості при ширококутнім скануванні та надані пропозиції щодо зменшення часу на проведення настроювання ФАР з одномірним скануванням у вертикальній площині.

4. Розроблена математична модель ФАР з урахуванням нелінійних властивостей амплітудно-фазових характеристик фазообертачів при зміні стану та одержано вирази, що дозволило отримати достовірну і незміщену оцінку ККПК при проведенні КТС.

5. Розроблений імітаційно-моделюючий комплекс та його програмне забезпечення для розрахунків, моделювання і аналізу характеристик ФАР та вибору місць розташування випромінювачів контрольного сигналу в ближній зоні, що дозволило знизити рівень сумарного сигналу на 25÷40 дБ і підвищити якість визначення ККПК ФАР.

6. Рішення поставлених задач забезпечило скорочення строків проведення настроювання й випробувань ФАР, підвищення якості і надійності роботи ФАР.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень, отримані при участі автора впроваджені на ряді промислових підприємств України (НДІ «КВАНТ», КЕМЗ "Іскра", ВАТ "Укрспецтехніка") і Росії (ВАТ "Тайфун", м. Калуга) та рекомендуються до використання в промислових та науково-дослідних організаціях, що здійснюють розробку і виробництво ФАР.

## ОСНОВНІ ПРАЦІ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Марков В.И. Встроенная система контроля ФАР / В.И. Марков // Вісник Київського Національного університету імені Тараса Шевченка. — К.: Київський університет — 2006. Вип. 2. — с. 94-100.
2. Автоматизированная система для контроля и настройки ФАР / .И. Гузь, В.И. Марков, А.А.Зайцев и др. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. К.: — 2007. Том 50, №1. — с. 46-51.
3. Основные тенденции развития ближнезонных методов измерения характеристик антенн. Ч.1. Методы измерений линейных и апертурных антенн / В.А. Усин, В.И. Марков, В.А. Губарь и др. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2006. Вып. 146. — С. 107-120.
4. Применение автоматизированных измерительных комплексов для оценки параметров сложных антенных систем / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2008. Вып. 154. — С. 172-178.
5. Настройка, контроль и калибровка АФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2009. Вып. 157. — С. 87-90.
6. Основные тенденции развития ближнезонных методов измерения характеристик антенн. Ч.2. Методы контроля, настройки и измерения параметров ФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина, А.Б. Филоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2010. Вып. 160. — С. 213-227.
7. Проблемные вопросы технологии настройки и калибровки ФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина, А.Б. Филоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2010. Вып. 161. — С. 64-71.
8. Системы контроля и диагностики технического состояния ФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина, А.Б. Филоненко // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — Киев. — 2011. Том 54, №2. — с 44-53.
9. Автоматизированный имитационно-измерительный комплекс для разработки и измерения характеристик ФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина, А.Б. Филоненко // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — К: — 2011. Том 54, №5. —с 47-54.
10. Технология проведения контроля технического состояния, настройки и калибровки АФАР / В. И. Гузь, В. И. Марков, А. А. Зайцев, А. Б. Филоненко // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2012. Т. 55, № 1. —С. 41-47.
11. Марков В.И. Контроль и оптимизация характеристик многоканальных ФАР / В.И. Марков, А.Б. Филоненко, В.А. Усин // Сборник трудов III Международной НТК “Антенно-фидерные устройства, системы и средства радиосвязи”. — 1997. Том 1. — Воронеж. — С. 294-301.
12. Марков В.И. Расчетно-экспериментальный метод настройки многоканальных ФАР. / В.И. Марков, А.Б. Филоненко, В.А. Усин. Электромагнитные волны и электронные системы. — 2004. т. 9, № 3-4. — с. 94-100.

13. Комбинированный метод измерения характеристик антенн. / В.А. Усин, В.А Ковальчук, В.И. Марков, А.Б. Филоненко // "Успехи современной радиоэлектроники" — 2005. №5. — стр. 65-71.
14. Markov V.I. Built-In Performance Monitoring System For Active Phased-Array Antennas / V.I. Markov // Proc. of the 6-th Int. Conference on Antenna Theory and Techniques, — Sevastopol, 2007 — pp. 483-485.
15. Markov V. I. Built-In Performance Monitoring Systems for Phased-Array Antennas with Binary Phase Shifters / V.I. Markov, A.F. Kozlov // Proc. of Antenna Measurement Techniques Association (AMTA) A03-063 — Irvine, California. — 2003. — pp. 560-565.
16. Markov V.I. Built-in performance monitoring system for high power transmitting phased-array antennas / V.I. Markov // Proc. of Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). — 2004. — pp.327-329.
17. Markov V. I., Filonenko A.B. Implementation of phase retrieval techniques for improving the results of phased array antennas near-field measurements // Proc. of MMET. — 2004. — pp.177-179.
18. Markov V.I. Implementation of phase retrieval techniques for phased-array antennas measurements / V.I. Markov, A.B. Filonenko // Proc. of AMTA— 2004.
19. Марков В.И. Использование априорной информации при калибровке АФАР / В.И.Марков, В.А. Усин // 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008.— Харьков: ХНУРЭ, 2008. — Том. I. Ч. 2. — с. 121-124.
20. Системы встроенного контроля активных ФАР / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина // Мат. 20-й междун. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — Севастополь: СевНТУ, 2010. — с. 965-966.
21. Технология настройки ФАР с широкоугольным сканированием / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина // Мат. 20-й междун. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь: СевНТУ, 2010. — с. 986-987.
22. Применение многоканальных разнесенных зондовых систем для повышения точности антенных измерений устройств / В.А. Усин, В.И. Марков, С.В. Помазанов, А.В. Усина // V Всероссийская конференция "Радиолокация и радиосвязь". — Москва, 2011. — с. 323-328.

## АНОТАЦІЯ

**Марков В.І. Настроювання та контроль технічного стану ФАР з урахуванням конструктивних особливостей антен. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – Антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012.

В дисертації запропонована методика і алгоритми настроювання багатоканальних ФАР у яких для настроювання можуть бути використані тільки фазообертачі, загальні для всіх каналів та комбінований метод визначення параметрів відхилених променів ФАР.

Вдосконалена методика настроювання ФАР для урахування впливу зміни взаємних зв'язків випромінювачів на діаграму спрямованості (ДС) при ширококутнім скануванні та надані пропозиції по зменшенню часу на проведення настроювання ФАР з одномірним скануванням у вертикальній площині.

Розроблена математична модель ФАР яка враховує нелінійні властивості амплітудно-фазових характеристик фазообертачів при зміні стану, що дозволило одержати незміщену оцінку ККПК і підвищити точність визначення параметрів при проведенні КТС.

Виконана розробка імітаційно-моделюючого комплексу та його програмного забезпечення для розрахунків, моделювання і аналізу характеристик ФАР та вибору місць розташування випромінювачів контрольного сигналу в ближній зоні, що надало змогу знизити рівень сумарного сигналу на 25÷40 дБ.

**Ключові слова:** ФАР, антенні вимірювання, математична модель, настроювання, вбудований контроль, калібрування, амплітудно-фазовий розподіл, діаграма спрямованості.

## АННОТАЦИЯ

**Марков В. И. Настройка и контроль технического состояния ФАР с учетом конструктивных особенностей антенн. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны и устройства микроволновой техники. - Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

Диссертационная работа посвящена построению автоматизированных измерительных комплексов (АИК) для измерения параметров и настройки ФАР и разработке встроенных систем контроля и калибровки (ВСКК), обеспечивающих проведение контроля технического состояния (КТС) ФАР.

Разработан комбинированный метод расчета параметров отклоненных лучей ФАР. Разработаны метод и алгоритмы настройки многоканальных ФАР, у которых для настройки могут быть использованы только фазовращатели, общие для всех каналов ФАР. Предложенный метод позволил практически полностью устранить ошибки пространственной ориентации равносигнального направления, обеспечил выравнивание КНД в приемных каналах, существенно сократил время

и повысил качество настройки антенны, обеспечил уменьшение уровня боковых лепестков (УБЛ) в канале с наибольшими ошибками реализации АФР за счет некоторого повышения УБЛ в каналах с меньшими ошибками.

Рассмотрены алгоритмы проведения КТС связанные с функциональным построением ФАР, разработаны методика проведения и алгоритмы обработки данных, учитывающие особенности аппаратурной реализации и условия эксплуатации ФАР. Основное внимание уделено системе ввода контрольного сигнала, процедурам проведения калибровки ФАР, поддержанию требуемого АФР на апертуре в процессе эксплуатации и вопросам технической реализации аппаратуры и программного обеспечения ВСКК ФАР.

Впервые предложен способ и алгоритмы проведения измерений, анализа и обработки данных, позволяющие получить несмещенные оценки технического состояния и параметров ФАР коммутационным методом и снимающие существующее ограничение в алгоритмах обработки в части гипотезы о неизменности амплитуды сигнала при переключении дискретов ФВ.

Проведено экспериментальное исследование методов КТС и настройки ряда образцов ФАР, разработаны практические рекомендации для эффективного использования результатов исследования в практических работах.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные при участии автора внедрены на ряде промышленных предприятий Украины и России.

**Ключевые слова:** параметры ФАР, антенные измерения, математическая модель, настройка, встроенный контроль, калибровка.

## ABSTRACT

### **Markov V.I. Alignment and Monitoring of PAA taking into account design features of antennas. – Manuscript.**

Thesis for a candidate's (PhD) degree on speciality 05.12.07 – Antennas and microwave devices. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2012.

The conditions and methods required for the phased array antennas (PAA) measurements, initial alignment, further automatic diagnostics and performance monitoring are described. The special attention is paid to questions of adjustment technologies and of undertaking the calibration of modern PAA and its T/R modules, which take into account the particularities connected with its hardware implementation, restrictions and service conditions. The problems and procedures of diagnostics and measurements of amplitude and phase distribution on aperture, for adjustment and calibrations of PAA are considered.

The special attention was paid to some practical aspects of designing and application of the built-in performance monitoring system (BPMS). The work extends the rotating element field vector (REFV) method techniques for considering PAA performance in several limiting cases, including the case wherein switching on bits of phase shifters inserts both amplitude and phase errors. The key questions of the built-in performance-monitoring systems designing, such as the choice the pilot signal injection

system and transfer matrix calibration, are presented here. Examples of experiments results and future research directions in antenna measurements and BPMS designing are highlighted.

**Key words:** phased-array antenna, antenna measurements, initial alignment, calibration, automatic fault diagnostics, performance monitoring.