

УДК 621.396.677.494

У.Р. Лієпінь<sup>1</sup>, Н.І. Світенко<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних сил ім. І. Кожедуба<sup>2</sup>Науково-метрологічний центр (військових еталонів), Харків

## МЕТОД І АЛГОРИТМ ДІАГНОСТИКИ І НАСТРОЙКИ ПОГОДЖУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В ТРАКТАХ РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ ФАР

*Запропонований новий метод експериментальної оцінки ефективності використання погоджувальних пристроїв для зменшення віддзеркалень в НВЧ трактах ФАР при зміні напрямку і частоти випромінювання. Метод базується на процедурах дискретного перетворення Уолша і не вимагає розміщення в НВЧ трактах антени вимірювальних пристроїв.*

*погоджувальні пристрої, прямого і зворотного дискретного перетворення Уолша*

### Вступ

#### Постановка завдання і аналіз літератури.

Основним слідством впливу взаємного зв'язку випромінювачів (ВЗВ) на амплітудно-фазовий розподіл (АФР) струмів збудження антенної решітки є утворення зворотної хвилі на входах випромінювачів ФАР. Для ослаблення впливу ВЗВ в даний час застосовують два основні методи:

– вимірювання матриці ВЗВ при калібруванні антени і множення вектора прийнятих сигналів на матрицю, зворотну матриці ВЗВ [1, 2], що компенсує вплив ВЗВ на АФР в антені;

– розміщення в НВЧ трактах розподільної системи (РС) антенної решітки погоджувальних пристроїв (ПП) у вигляді перебудовуваних реактивних чотириполосників, компенсуючих ланцюгів зв'язку між живлячими фідерними лініями, діелектричних вставок [3].

Перший метод вирішує задачу узгодження випромінювачів з РС для всіх кутів випромінювання (прийому) і на всіх робочих частотах (для яких відома матриця ВЗВ). Реалізуємо метод за наявності інформації про матрицю ВЗВ і доступу до управління амплітудою і фазою сигналу в кожному каналі антени. Застосовується, в основному, в цифро-

вих антенних решітках.

Для реалізації другого методу узгодження необхідно знати залежності вхідних опорів випромінювачів від частоти і напрямку фазування антени і створити погоджувальні пристрої, що змінюють свої параметри при зміні кута сканування. Застосовується метод, в основному, в решітках з хвилемвідним живленням, що мають сильний взаємний зв'язок випромінювачів, через РС. Основною проблемою при реалізації методу на практиці є досягнення прийняттого рівня віддзеркалень для всіх кутів сканування і на всіх робочих частотах [3].

**Метою статті** є розробка методу діагностики стану і подальшої настройки ПП в РС за критерієм досягнення мінімуму коефіцієнта віддзеркалення (КВ) в кожному каналі для всіх кутів сканування і на всіх робочих частотах.

Новим в запропонованому методі є те, що інформація про КО в НВЧ трактах ФАР береться з аналізу зміни вихідного сумарного сигналу решітки для різних фазувань, а не з показань вимірювальних приладів, розміщених в НВЧ трактах антени, як це пропонується в [4, 5].

### Основний матеріал

Розглянемо реалізацію запропонованого методу

діагностики і настройки досліджуваної лінійної еквідистантної ФАР, розміщеної в безлуновій камері. Приймальний вимірювальний зонд (ВЗ) розташований в ближній зоні ФАР на напрямі нормалі до її апертури. В якості зондуючого сигналу (ЗС) використовується безперервне гармонійне коливання, що випромінюється на одній з робочих частот ФАР. Вихід приймального ВЗ підключений до ампліфазометру (АФМ). На опорний вхід АФМ подається ЗС. АФМ визначає відношення комплексних амплітуд ЗС з виходу ВЗ і опорного входу (у цифровій формі).

Нехай структурна схема ФАР складається із стандартного набору каскадно сполучених блоків: генератора ЗС, розподільної системи (РС), блоку фазообертачів (ФО) і випромінюючої системи (ВС) [3]. Відгук ІЗ на випромінювання ФАР представимо у вигляді, аналогічному [4, 7]:

$$Y = \sum_i y_i \rho_i, \quad i \in 0, N-1, \quad (1)$$

де  $i$ ,  $N$  – номери і число випромінювачів в досліджуваній ФАР;

$$y_i = x K_i [1 - \Gamma_i] \Phi_i \quad (2)$$

– комплексна амплітуда ЗС на входах випромінювачів ФАР;

$x$  – комплексна амплітуда ЗС;

$K_i$  – коефіцієнт передачі (КП) РС;

$\Gamma_i$  – КВ від входу  $i$ -го випромінювача;

$\Phi_i$  – КП  $i$ -го фазообертача (ФО);

$$\rho_i = \frac{\sqrt{G_i G_3}}{2\eta r_i} g_i(\theta_i) g_3(-\theta_i) \exp[j\eta r_i] \quad (3)$$

– КП від входу  $i$ -го випромінювача ФАР до виходу ВЗ [6];

$G_i, G_3$  – коефіцієнти посилення  $i$ -го випромінювача ФАР і зонда;

$\eta = 2\pi\lambda^{-1}$  – хвильове число;

$r_i$  – відстань від фазового центру  $i$ -го випромінювача до фазового центру ВЗ;

$g_i(\theta), g_3(\theta)$  – нормовані ДН випромінювачів ФАР і зонда, відповідно, зміряні при інших експериментах;

$\theta_i$  – кут між нормаллю до апертури ФАР в центрі  $i$ -го випромінювача і напрямом на ВЗ.

Для виділення внеску  $i$ -го випромінювача ФАР у відгуку ВЗ скористаємося методом дискретного перетворення Уолша (ДПУ), описаному [7]. При його реалізації необхідно:

– провести  $N$  випромінювань ФАР, відповідних  $N$  реалізаціям складових повного ряду прямого перетворення Уолша

$$Y_r = \sum_i y_i w_{ri} \rho_i, \quad r \in 0, N-1, \quad (4)$$

де  $w_{ri}$  – функції Уолша (що приймають тільки два значення (+1) або (-1)), впорядковані по Адамару або Пелі [2, 7]; реалізуються вони ФО решітки, що зрушують фазу ЗС на  $0^\circ$  (+1) або  $180^\circ$  (-1);

– запам'ятати вектор  $N$  комплексних амплітуд сигналу на виході АФМ, відповідний прямому ДПУ, у вигляді

$$Y_r^\circ = \sum_i y_i^\circ w_{ri} \rho_i, \quad (5)$$

де  $Y_r^\circ = Y_r x^{-1}$ ;  $y_i^\circ = y_i x^{-1}$  – комплексні амплітуди ЗС, нормовані в АФМ до опорного сигналу;

– провести процедуру зворотного ДПУ і одержати оцінки добутків

$$z_i = \sum_r Y_r^\circ w_{ri} = y_i^\circ \rho_i = K_i [1 - \Gamma_i] \Phi_i \rho_i. \quad (6)$$

Для отримання «чистих» оцінок  $\mathcal{F}_i$ , необхідно  $z_i$  розділити на відомі КП  $\rho_i$  [6] від входів випромінювачів до виходу ВЗ:

$$\mathcal{F}_i = z_i \rho_i^{-1} = K_i [1 - \Gamma_i] \Phi_i. \quad (7)$$

В цьому співвідношенні [2, 3]:

$$\Gamma_i = \left( \sum_k K_k \Phi_k C_{ik} \right) \cdot (K_i \Phi_i)^{-1}, \quad i, k \in 0, N-1; \quad (8)$$

– КВ від входу  $i$ -го випромінювача;

$$\Phi_i = \exp(-j\psi_i); \quad \psi_i = i \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta; \quad (9)$$

– КП ФО і фазові зрушення у ФО при орієнтації променя антени в напрямі  $\theta$  і довжині хвилі  $\lambda$ ;  $d$  – відстань між випромінювачами ФАР;

$C_{ik}$  – коефіцієнти матриці розсіяння ВС, залежні від ступеня зв'язку між випромінювачами ФАР.

З (7), (8) видно, що, змінюючи КП ФО  $\Phi_i$  можна одержати залежність добутку  $K_i [1 - \Gamma_i]$ , тобто залежність КП РС, в якій є які-небудь ПП, від кутів фазування антени  $i$ , відповідно, від робочої частоти, що входять до (9).

Це дає право представити (7) у наступному вигляді:

$$\mathcal{F}_i(\theta, f) = K_i(\theta, f) [1 - \Gamma_i(\theta, f)] \Phi_i(\theta, f). \quad (10)$$

Залежність КП РС, що нас цікавить, спільно з ПП, від  $\theta$  і  $f$ , має вигляд

$$K_i(\theta, f) [1 - \Gamma_i(\theta, f)] = \frac{\mathcal{F}_i(\theta, f)}{\Phi_i(\theta, f)}. \quad (11)$$

З (11) витікає, що метод і алгоритм отримання оцінки впливу СУ на КВ від випромінювачів ФАР, включає наступні процедури.

Проведення, послідовно в часі,  $N$  процедур прямого ДПУ зондуючого сигналу, використовуючи випромінювачі і ФО ФАР, а також приймач ВЗ, тобто АФМ, згідно (4).

Одержати  $N$  значень відгуків ВЗ, запам'ятати

їх і здійснити над ними процедуру зворотного ДПУ, згідно (6).

Одержати  $N$  оцінок результуючих КП НВЧ трактів  $z_i$  від входів РС до входів випромінювачів, згідно (7).

Реконструювати  $N$  оцінок результуючих КП РС, що містить СУ, згідно (11).

Для отримання залежності результуючого коефіцієнту передачі розподільної системи від кутів сканування  $\theta$  і частоти випромінювання  $f$  (або довжини хвилі  $\lambda$ ), необхідно процедури (1) – (4) реалізувати  $N_s N_f$  разів, де,  $N_f$  – число кутових дискрет і робочих частот, відповідно.

Одержана таким чином залежність  $K_i$  від  $\theta$  і  $f$  дозволяє оцінити ефективність застосування даного типу СУ (за критерієм мінімуму  $\Gamma_i$ ) і здійснити настройку СУ, якщо вони перебудовуються.

Реалізація алгоритму у вимірювально-обчислювальній системі, розміщеній в безлунової камері, припускає додатково до описаної в [6] апаратурі мати процесор ДПУ і обчислювальні засоби, що реалізують операції ділення (7) і (11).

Застосування запропонованого в даній статті методу і алгоритму оцінки коефіцієнту передачі розподільної системи, що має в своєму складі СУ, дозволить оцінити ефективність зниження перекручувань амплітудно-фазового розподілу струмів збудження решітки ВСЗ за рахунок використання різних СУ (з різними параметрами) і реконструювати дійсно реалізовані ДН решітки при скануванні променя і зміні частоти випромінювання шляхом підсумовування одержаних згідно (7) значень  $\mathcal{E}_i$ .

Метод реалізується без включення вимірювальних пристроїв в НВЧ тракти ФАР.

## Висновок

Запропонований метод і алгоритм, що дозволяє контролювати ефективність застосування і настроювати погоджуючі пристрої, розміщені в НВЧ трактах розподільної системи ФАР, використовуючи для цього процедури прямого і зворотного дискретного перетворення Уолша.

## Список літератури

1. Solomon Y.S.D., Abramovic Y.Y., Anderson S.Y. "Receiver Array Calibration using disparate sources", *IEEE Trans. SP*, v. 47, N3, March 1999. – Pp. 496-505.
2. Шифрин Я.С., Лиєпінь У.Р., Головин Г.А. Экспериментальная оценка и использование матрицы взаимных связей излучателей в ФАР // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 7. – С. 3-10.
3. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ / Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
4. Есин С.В., Каганов В.И. Системы автоматического фазирования в передающих ФАР и устройствах сложения мощности СВЧ сигналов // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1986. – № 8. – С. 39-48.
5. Гимпилевич Ю.Б. Теоретические основы встроенного контроля и диагностики микроволновых трактов радиотехнических систем: Дисс. ... доктора техн. наук: 05.12.17 – Севастополь, 2004 – 452 с.
6. Бубнов Г.Г., Никулин С.М., Серяков Ю.Н. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР. – М.: Радио и связь, 1988. – 120 с.
7. Активные ФАР / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.

Надійшла до редколегії 21.08.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.