

УДК 621.386.484

У.Р. Ліпін, С.М. Порошин, Г.О. Головін

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНOSTІ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Показана можливість, використовуючи результати контролю амплітудно-фазового розподілу (АФР), одержати оцінки параметрів реалізованих діаграм спрямованості (ДС), минаючи процедури відновлення відліку ДС, і порівняння їх для кожного напрямку сектора сканування променя ФАР. Основу методу складають процедури порівняння коефіцієнтів просторового спектра АФР, отриманого методами швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Вступ

Останнім часом у галузі теорії і техніки ФАР та активних ФАР (АФАР) активно розробляються методи їх контролю й адаптації до технічного стану [1 – 3]. Складовою частиною цих методів є процедури оцінки працездатності ФАР, що включають оцінки дійсно реалізованих параметрів ДС, порівняння їх з номінальними значеннями й ухвалення рішення про необхідність включення систем адаптації або ремонту окремих вузлів решітки [1, 3, 4]. Оцінка АФР і параметрів ДС ФАР припускає реалізацію одного з методів діагностики решітки, описаних у [1, 5, 6]. Спосіб одержання й обробки інформації, отриманої при діагностиці, визначає точність і час одержання оцінок параметрів ДС досліджуваної ФАР.

Аналіз літератури

Застосовувати аналітичні вирази, що пов'язують спотворення параметрів ДС решіток з похибками в реалізації АФР і використовуваними в статистичній теорії антен, наприклад [7], можна тільки в умовах відсутності несправностей типу відмов фазообертачів і випромінювачів. При відмовах не виконується умова малості похибок, яка використовується в [7].

У [8] описана методика оцінювання параметрів ДС за числовим значенням АФР у решітці, отриманим після обробки результатів вимірів поля випромінювання в ближній зоні антени. Основу застосованої у [8] методики становлять процедури швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Далі буде показано, що, використовуючи результати ШПФ від АФР, можна оцінити коефіцієнт спрямованої дії (КСД) і рівень бічних пелюсток (РБП) у ДС. Однак визначи-

ти з достатньою точністю один з найважливіших параметрів ДС – орієнтацію напрямку головного максимуму (НГМ) – цим методом проблематично.

Причина в тому, що, якщо є відновлені значення АФР у N каналах, то відліки комплексних значень параметрів ДС при реалізації ШПФ будуть прямувати з кроком $\Delta\psi = 2\pi N^{-1}$, що відповідає половині ширини ДС по нулях. Мінімальний же зсув променя ФАР визначається виразом [9]

$$\delta\psi = 2\psi_{0,5p} g_0 N^{-1},$$

де $2\psi_{0,5p}$ – ширина ДС за половинною потужністю;

$$g_0 = 2\pi 2^{-k};$$

k – розрядність фазообертача (ФО).

При $k = 4$ відношення $\Delta\psi/\delta\psi \approx 3N$. Для того, щоб оцінити точність установки променя ФАР цим методом повинна виконуватися умова $\Delta\psi/\delta\psi \ll 1$. Якщо навіть $\Delta\psi/\delta\psi = 0,5$, то в БШФ кількість відмов необхідно збільшити як мінімум у $6N$ раз. У [8] пропонується до реальних відліків АФР додавати нулі, у даному випадку $6N$ нулів. Для багатоелементних ФАР це приведе до громіздких обчислень, пов'язаних з перемножуванням нулів. Навіть якщо це реалізувати й одержати відліки комплексних значень ДС, залишаються проблеми їх запам'ятовування і пошуку максимуму складної, сильно коливної функції.

Мета статті – розробка методу оперативної оцінки параметрів ДС ФАР за результатами її діагностики.

Основна частина

Суть запропонованої методики полягає в наступному. З загальної теорії антенних решіток і перетво-

ренъ Фур'є відомо, що, якщо АФР у лінійній еквідистантній антенній решітці представити у вигляді ряду

$$\dot{a}_i = \sum_r \dot{\alpha}_r \exp(-jrg\psi_0 i), \quad i, r \in 0, N-1, \quad (1)$$

де $\dot{\alpha}_r = N^{-1} \sum_i \dot{a}_i \exp(jrg\psi_0 i), \quad \psi_0 = 2\pi N^{-1}.$ (2)

Тоді комплексна ДС антенної решітки

$$\dot{F}(\psi) = \sum_i \dot{a}_i \exp(ji\psi) = \sum_r \dot{\alpha}_r \dot{f}_r(\psi), \quad (3)$$

де $\psi = 2\pi d\lambda^{-1} \sin \theta$ – узагальнений кут;

d, λ – міжелементна відстань і довжина хвилі, відповідно;

θ – кут, відлічуваний від нормалі до апертури антени;

$$\dot{f}_r(\psi) = \sum_i \exp[ji(\psi - rg\psi_0)], \quad r \in 0, N-1 \quad (4)$$

парціальні ДС, що не залежать від \dot{a}_i .

З (3) випливає, що всі параметри ДС $\dot{F}(\psi)$ визначаються значеннями коефіцієнтів $\dot{\alpha}_r$ ряду (2).

Вперше оцінка параметрів ДС шляхом аналізу відношень $\dot{\alpha}_r / \dot{\alpha}_0$ була використана при визначенні впливу амплітудного розподілу на ширину ДС і КСД. Симетричний амплітудний розподіл у [10] представлений у вигляді речовинного ряду Фур'є по косинусах. Було показано, наприклад, що для оцінки ширини ДС досить інформації тільки про два перші члени ряду Фур'є, яким представлено амплітудний розподіл.

У статті пропонується для оцінювання параметрів ДС скористатися комплексним рядом (2), що включає спотворення як амплітудного, так і фазового розподілів. Будемо вважати, що

$$\dot{a}_i(\theta) = [A_i + \Delta_i(\theta)] \exp[j\xi_i(\theta)], \quad (5)$$

де A_i – номінальний амплітудний розподіл у решітці;

$\Delta_i(\theta), \xi_i(\theta)$ – помилки в реалізації амплітудного і фазового розподілів при фазуванні решітки в напрямку θ , отримані в результаті діагностики ФАР.

Надалі для скорочення записів залежність \dot{a}_i від θ буде опущена.

При розробці алгоритмів, що дозволяють за оцінками \dot{a}_i реконструювати числові значення основних параметрів реалізованих ДС, будемо користуватися співвідношенням (3). Аналіз цього виразу, а також результатів розрахунків, наведених у [9], дозволяє зробити такі висновки:

результуюча ДС ФАР $\dot{F}(\psi)$ може бути представлена суперпозицією ортогональних парціальних ДС $\dot{f}_r(\psi)$, комплексні амплітуди яких дорівнюють коефіцієнтам $\dot{\alpha}_r, r \in 0, N-1$, ряду (2);

максимуми парціальів $\dot{f}_r(\psi) = \dot{f}_0(\psi - rg\psi_0)$ розташовуються на місцях r -их нулів ідеального множника решітки $\dot{f}_u(\psi) = \sum_i \exp(ji\psi), \quad i \in 0, N-1$;

на головний максимум ДС $\dot{F}(\psi), |\psi| \leq 2\pi N^{-1}$, найбільше впливають парціальи з номерами $r = 1$ і $r = N-1$ або $r = -1$ ($\psi_{r,i} = rg\psi_0 i = -2\pi N^{-1} i$ при $r = -1$ і $r = N-1$); інші парціальи при $|r| > 1$ зачіпають головний максимум тільки своїми бічними пелюстками.

При атестації ФАР як основні параметри її ДС звичайно вибирають: точність електричної установки променя в заданому напрямку, ширину ДС і РБП [8]. Як вихідний функціонал, аналізуючи який визначаються перелічені параметри ДС, звичайно використовується квадрат модуля множника системи [7, 10]. Використовуючи (3), такий функціонал можна записати у вигляді

$$P(\psi) = |\dot{F}(\psi)|^2 = \sum_r \sum_p \dot{\alpha}_r \alpha_p^* \dot{f}_r(\psi) \dot{f}_p^*(\psi), \quad r, p \in 0, N-1. \quad (6)$$

Для оцінки НГМ скористаємося традиційним прийомом прирівнювання нулевій похідній нормованого значення $P(\psi)$ [7, 10], тобто сформуємо рівняння вигляду

$$\frac{\partial P(\psi)}{\partial \psi} = \sum_r \sum_p \dot{\alpha}_r \alpha_p^* \frac{\partial}{\partial \psi} [\dot{f}_r(\psi) \dot{f}_p^*(\psi)] = 0, \quad (7)$$

розв'язуючи яке відносно ψ можна знайти НГМ.

Для спрощення розв'язання (7) скористаємося такими допущеннями:

1) $\dot{f}_r(\psi) = f_r(\psi)$ – дійсні, нормовані відносно N функції, $f_r(0) = 0$ при $r \neq 0$;

$$2) f_0(\psi) \approx 1 - N^2 \psi^2 / 24;$$

$$3) \lim_{\psi \rightarrow 0} f_0'(\psi) = 0, \quad \lim_{\psi \rightarrow 0} f_r'(\psi) = r(-1)^{r+1} \psi_0^{-1},$$

де $f_r'(\psi) = \partial f_r(\psi) / \partial \psi$; $\psi_0 = 2\pi N^{-1}$;

$$4) -0,5N - 1 \leq r \leq 0,5N.$$

Використовуючи перелічені допущення і залишаючи в (7) доданки тільки з номерами $r, p = 0, \pm 1$, одержимо спрощений вираз

$$\psi \approx \frac{2}{N} 4 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_{-1}}{\dot{\alpha}_0} \right\}. \quad (8)$$

З (8) випливає, що $\psi = 0$, тобто зсуву НГМ немає, за умови $\dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha}_{-1} = \dot{\alpha}_{N-1}$, незалежно від їх абсолютних значень. Це є наслідком того, що, згідно з (5), $\dot{\alpha}_i$ визначається результуючою формою амплітудного розподілу, яка задається номінальним АР A_i . При $A_i = 1$ і $\Delta_i = \xi_i = 0$ коефіцієнти $\dot{\alpha}_r = 0$ при $r \neq 0$. Це очевидна умова правильної орієнтації НГМ. При $A_i \neq 1$, наприклад відповідному дольчебишовському розподілові, $\dot{\alpha}_r \neq 0$ ні при яких r [10]. У цьому випадку умова відсутності зсуву НГМ – симетрія АФР, при якому $\dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha}_{-1}$.

Точність оцінок зсуву НГМ, які формуються згідно з (8), в основному визначається точністю апроксимації $f_0(\psi)$ степеневим рядом. Моделювання показує, що (8) зберігає прийнятну точність (помилки у визначенні ψ одиниці відсотків від ширини ДС), за умови збереження головного максимуму, тобто за умови, що

$$P(\psi) \geq 0,5, \quad |\psi| \leq 2\pi N^{-1}.$$

Вихідним при оцінці ширини ДС є таке рівняння [7]:

$$P(\psi) = \sum_r \sum_p \dot{\alpha}_r \alpha_p^* f_r(\psi) f_p^*(\psi) = 0,5, \quad r, p \in 0, N-1. \quad (9)$$

При розв'язанні (9) скористаємося тим же прийомом, який використовувався в [7, 10], тобто знайдемо ψ , при яких $P(\psi) = 0,5$ для правої і лівої сторін ДС. Врахуємо також, що на ширину ДС основний вплив роблять доданки (9) з номерами $r = 0; \pm 1$.

На праву частину головного максимуму основний вплив роблять $|\dot{\alpha}_1| f_1(\psi)$, на ліву – $|\dot{\alpha}_{-1}| f_{-1}(\psi)$.

З огляду на сказане, з (9), після нескладних, але стомлюючих обчислень, можна одержати, що

$$2\psi_{0,5p} = \frac{5,6}{N} + \frac{2,8}{N} \left[\frac{|\dot{\alpha}_1| + |\dot{\alpha}_{-1}|}{|\dot{\alpha}_0|} \right], \quad (10)$$

де $5,6 N^{-1}$ – номінальна ширина множника системи решітки при $A_i = 1$.

Величина $2\psi_{0,5p}$, отримана з (10), дуже близька до оцінки ширини ДС для різних амплітудних розподілів, яка наведена в [10]. Точність оцінки (10), як і (8), визначається точністю апроксимації $f_0(\psi)$ і $f_0^2(\psi)$ степеневим рядом.

Як вихідний функціонал при оцінці КСД використовуємо таке співвідношення [7, 10]:

$$D = \left| \sum_i \dot{\alpha}_i \right|^2 \left\{ \sum_i |\dot{\alpha}_i|^2 \right\}^{-1}. \quad (11)$$

Підставивши в (11) замість $\dot{\alpha}_i$ їх значення згідно з (1), одержимо, що

$$D = N |\dot{\alpha}_0|^2 \left\{ \sum_r |\dot{\alpha}_r|^2 \right\}^{-1}, \quad r \in 0, N-1, \quad (12)$$

де враховані рівності

$$\sum_i \exp(-jr\psi_0 i) = \begin{cases} N, & r = 0; \\ 0, & r \neq 0. \end{cases} \quad (13)$$

Використовуючи співвідношення (12), можна оцінити КСД множника лінійної еквідистантної антенної решітки (без урахування ефектів взаємного впливу випромінювачів) при будь-якому амплітудному розподілі і будь-яких спотвореннях фазового розподілу.

При оцінці рівня бічних пелюсток рекомендується крім набору коефіцієнтів $\dot{\alpha}_r$, що відповідають (2), сформулювати зсунуту до центра бічних пелюсток ідеального множника системи $f_u(\psi)$ послідовність коефіцієнтів

$$\dot{\beta}_r = N^{-1} \sum_i \dot{\alpha}_i \exp[ji\psi_0(r+0,5)], \quad r \in 1, N-2. \quad (14)$$

Обвідна бічних пелюсток може бути оцінена двома наборами відношень коефіцієнтів:

$$u_r = 10 \log \left\{ \frac{|\dot{\alpha}_r|^2}{|\dot{\alpha}_0|^2} \right\}, \quad r \in 1, N-2;$$

$$v_r = 10 \log \left\{ \frac{|\dot{\beta}_r|^2}{|\dot{\beta}_0|^2} \right\}, \quad r \in 1, N-2. \quad (15)$$

Відліки значень комплексної ДС в області бічних пелюсток при використанні u_r і v_r впливають з інтервалом кутів $\psi = 0,5\psi_0 = \pi N^{-1}$. Цього, як стверджують автори [8], цілком достатньо для оцінки обвідної РБП.

Висновок

У статті отримані аналітичні вирази, що дозволяють оцінити основні параметри ДС ФАР, використовуючи результати застосування процедур ШПФ до комплексних значень АФР у решітці. Для оцінки зсуву НГМ і ширини ДС у N канальній решітці досить мати інформацію про три коефіцієнти спектра, який формується ШПФ; для оцінки КСД – N коефіцієнтів, а для оцінки обвідної РБП – $2N$ коефіцієнтів. Як вихідна інформація алгоритмів (ШПФ) можуть бути використані результати НВЧ діагностики або вбудованого диференціального низькочастотного контролю АФР решітки. Застосування пропонованої методики дозволяє в системах контролю ФАР перейти від підрахунку кількості несправних каналів системи керування променем до оперативних оцінок параметрів, реалізованих при скануванні ДС, і порівняти їх з номінальними значеннями. Це дозволить прийняти більш обґрунтоване рішення про стан решітки і необхідність реалізації в ній адаптації до технічного стану або проведення ремонту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
2. Шишов Ю.А., Голик А.М. Адаптация управления ФАР по результатам встроенного контроля // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – № 9. – С. 69 – 89.
3. Гусевский В.И., Лидский Э.А., Рыжков С.В. Принципы построения антенных систем, адаптивных к собственному состоянию // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37, № 6. – С. 38 – 43.
4. Shifrin J.D., Liepin U.R., Golovina L.V. Method and Algorithms of PAARP synthesis adaptive to its elements failure // Proc. of the Third International Conf. on Ant. Theory and Techn. – Sevastopil, Ukraine. – 1999. – P. 297 – 298.
5. Воронин Е.Н., Нечаев Е.Н., Шашенков В.Ф. Реконструктивные антенные измерения. – М.: Наука, 1995. – 352 с.
6. Шифрин Я.С., Лиепинь У.Р. Бесфазовые методы диагностики фазированных антенных решеток // Антенны. – 2000. – № 1(44). – С. 84 – 99.
7. Шифрин Я.С., Корниенко Л.Г. Статистика поля антенных решеток // Антенны. – 2000. – № 1(44). – С. 3 – 27.
8. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бакрах, С.Д. Кременецкий и др. – Л.: Наука, 1985. – 272 с.
9. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. радио, 1972. – 320 с.
10. Сканирующие антенные системы СВЧ / Перевод с англ. под ред. Г.Т. Маркова. – М.: Сов. радио, 1968. – Т. II. – 496 с.

Надійшла 30.11.2005

Рецензент: д-р техн. наук професор В.І. Карпенко, Харківський університет Повітряних Сил.