

УДК 621.397.671

Л.Г. Корнієнко, В.В. Кобзєв, О.В. Коломійцев

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

СПРЯМОВАНІ ВЛАСТИВОСТІ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ З ВИПАДКОВИМИ НЕОДНОРІДНИМИ ФАЗОВИМИ ПОХИБКАМИ

Розглянута середня діаграма спрямованості лінійних фазованих антенних решіток з випадковими фазовими похибками, які мають неоднорідну дисперсію уздовж випромінюючої системи. Проаналізовані результати розрахунків для лінійних решіток з двома законами зміни дисперсії фазового розподілу. Виявлені різниці в статистичних характеристиках поля решіток з однорідними і неоднорідними фазовими похибками.

Ключові слова: антенна решітка, амплітудно-фазовий розподіл, однорідні та неоднорідні фазові похибки, дисперсія, радіус кореляції, середня та регулярна діаграми спрямованості, потужність розсіяння, статистичний амплітудний розподіл.

Вступ

В роботах по статистичній теорії антен (СТА) дослідження характеристик антен виконуються у припущенні, що випадкові похибки в розкриві є статистично однорідними, тобто їх середні значення і дисперсії не залежать від координат випромінювачів [1–2].

Однак, при певних умовах похибки стають статистично неоднорідними. Таке явище притаманне антенам із значними розмірами, в котрих із-за наявності температурних та вагових градієнтів виникають деформації, нестабільності, що приводять до появи неоднорідних похибок в амплітудно-фазовому розподілі (АФР). Неоднорідності в розподілі похибок виникають також при локальних несправностях, наприклад у багатоступеневих системах збудження випромінювачів активних фазованих антенних решіток [3].

Отже, виникає потреба в розвитку СТА в напрямку дослідження впливу неоднорідних випадкових похибок в АФР на статистичні характеристики антен.

Мета роботи полягає в дослідженні впливу неоднорідних фазових похибок на середню діаграму спрямованості (ДС) лінійних фазованих антенних решіток і залежності його від амплітудного розподілу.

Основний матеріал

Загальний аналіз середньої ДС. Розглянемо лінійну еквідистантну антенну решітку з N ідентичних однаково орієнтованих ізотропних випромінювачів (рис. 1). Амплітудно-фазовий розподіл, окрім регулярної складової $a_n = |a_n| \exp(j\varphi_n)$, має випадкові фазові похибки (флуктуації) $\delta\varphi_n$, які розподілені за нормальним законом з нульовим середнім значенням $\overline{\delta\varphi_n} = 0$, неоднорідною дисперсією $\sigma_{\varphi_n}^2$ та коефіцієнтом кореляції $r_\varphi(n, m) = \overline{\delta\varphi_n \delta\varphi_m} / \sigma_{\varphi_n} \sigma_{\varphi_m}$.

Для сканування променем у ФАР використовують лінійний фазовий розподіл $\varphi_n = -knd \cos \theta_0$,

де $k=2\pi/\lambda$ – хвильове число вільного простору, кут θ_0 визначає напрямок головного максимуму регулярної (у відсутності похибок) діаграми спрямованості (ДС), d – крок решітки.

Окрема реалізація комплексної ДС решітки з непарним числом випромінювачів має вигляд

$$f(\psi) = \sum_{n=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} |a_n| \phi_n \exp(jn\psi), \quad (1)$$

де $\psi = kd(\cos\theta - \cos\theta_0)$, $\phi_n = \exp(j\delta\varphi_n)$ – функція фазових похибок.

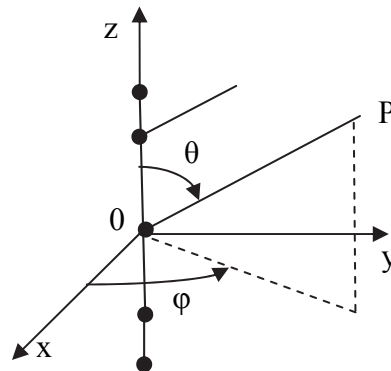


Рис. 1. Лінійна антенна решітка в системі координат

Середня ДС за потужністю буде дорівнювати

$$\overline{|f(\psi)|^2} = \sum_{n, m=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} |a_n| |a_m| Q_{nm} \exp(j(n-m)\psi), \quad (2)$$

де $Q_{nm} = \overline{\phi_n \phi_m^*}$ – другий початковий момент функції похибок.

Для визначення Q_{nm} зручно скористатися методом характеристичної функції [4]. Використання цього методу [1–2; 5] приводить до наступного результату:

$$Q_{nm} = \overline{\phi_n \phi_m^*} = \overline{\exp j(\delta\varphi_n - \delta\varphi_m)} = \exp[-0,5(\sigma_{\varphi_n}^2 + \sigma_{\varphi_m}^2 - 2\sigma_{\varphi_n} \sigma_{\varphi_m} r_\varphi(n, m))].$$

Середню ДС доцільно порівнювати з регулярною ДС (у відсутності похибок). Тому пронормуємо (2) до максимуму регулярної ДС $|f_{0\max}|^2$.

Нормована середня ДС за потужністю

$$\overline{|F(\psi)|^2} = \frac{\left| \sum_{n,m=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} |a_n a_m^*| Q_{nm} e^{j\psi(n-m)} \right|^2}{\left| \sum_{n=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} |a_n| \right|^2} \quad (3)$$

не залежить від азимутального кута φ , є періодичною функцією з періодом $\psi = 2\pi$ і розташована у межах $-kd(1+\cos\theta_0) \leq \psi \leq kd(1-\cos\theta_0)$ (область видимості). Дослідження ДС як функції ψ поширює результати на решітки з будь-яким кроком і орієнтацією променя.

У відсутності міжелементної кореляції (некорельовані фазові похибки) $r_\varphi(n, m) = \delta_{nm}$, де $\delta_{nm} = 1$ при $n=m$, 0, при $n \neq m$ – символ Кронекера, функція $Q_{nm} = 1$ при $n=m$, $\exp(-0,5(\sigma_{\varphi n}^2 + \sigma_{\varphi m}^2))$ при $n \neq m$. Вираз (3) приймає наступний вигляд

$$\overline{|F(\psi)|^2} = \left\{ \left| \sum_{n=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} \exp(-0,5\sigma_{\varphi n}^2) |a_n| \exp(j\psi n) \right|^2 + \sum_{n=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} (1 - \exp(-\sigma_{\varphi n}^2)) |a_n|^2 \right\} / |f_{0\max}|^2 \quad (4)$$

Перший доданок в (4) дорівнює регулярній ДС за потужністю решітки з амплітудним розподілом $A_n = |a_n| \exp(-0,5\sigma_{\varphi n}^2)$ (назвемо його статистичним) і визначає когерентну складову поля випромінювання. Статистичний амплітудний розподіл визначає вклад кожного випромінювача у когерентну складову поля. При значній дисперсії фазових похибок цей вклад значно зменшується. Когерентна складова внаслідок зміни неоднорідними похибками амплітудного розподілу на відміну від однорідних похибок відрізняється по формі від регулярної ДС.

Другий доданок в (4) визначає розсіюну потужність $S_r = \sum_n (|a_n|^2 - |A_n|^2) / |f_{0\max}|^2$, рівень якої не залежить від кутових координат. Вона вилучається з регулярного когерентного випромінювання і внаслідок некорельованості похибок рівномірно розсіюється у просторі.

Для повністю корельованих фазових похибок $r_\varphi(n, m) = 1$ і нормована середня ДС за потужністю

$$\overline{|F(\psi)|^2} = \sum_{n,m=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} |a_n| |a_m| e^{-0,5(\sigma_{\varphi n} - \sigma_{\varphi m})^2} e^{j(n-m)\psi} \quad (5)$$

на відміну від однорідних похибок не співпадає з нормованою регулярною ДС $|F_0(\psi)|^2$, бо при «друж-

ньому» нерівномірному розкиду фаз сигналів в розкриті решітки окремі реалізації фазового розподілу відрізняються за законом від фазового розподілу у відсутності похибок. Відмінності $\overline{|F(\psi)|^2}$ від $|F_0(\psi)|^2$ залежать від різниць середньоквадратичних значень похибок, які можуть бути значними для різко неоднорідних похибок.

Результати чисельних розрахунків. Виберемо амплітудний розподіл у вигляді косинуса в степені p на підставці Δ

$$a_n = \Delta + (1 - \Delta) \cos^p \frac{n\pi}{N-1}, \quad (6)$$

$$n \in -0,5(N-1); 0,5(N-1), \quad 0 \leq \Delta \leq 1.$$

Для опису закону розподілення дисперсії фазових похибок уздовж решітки скористаємося функціями

$$\sigma_{\varphi n}^2 = a + b(n/0,5(N-1))^2; \quad (7, a)$$

$$\sigma_{\varphi n}^2 = a + b(1 - (n/0,5(N-1))^2). \quad (7, б)$$

Вони описують симетричні неоднорідні похибки і визначають випадки, коли дисперсія зростає (7, а) – похибки першого типу, або спадає (7, б) – похибки другого типу, за квадратичним законом до країв антени з однаковими максимальними $a+b$ і мінімальними a значеннями.

Для розрахунку середньої ДС за потужністю виберемо коефіцієнт кореляції фазових похибок в експоненціальній формі [2]:

$$r_\varphi(n, m) = \exp(-|n - m| / c_\varphi), \quad (8)$$

де $c_\varphi = \rho_\varphi / d$, ρ_φ – радіус кореляції фазових флуктуацій.

Проаналізуємо нормовану середню ДС за потужністю в залежності від узагальненого кута $\Psi = 0,5N\psi = (\pi L/\lambda)(\cos\theta - \cos\theta_0)$ та відносного радіуса кореляції $C = 2c_\varphi/N = 2\rho_\varphi/L$, як прийнято в статистичній теорії безперервних систем [1], $L = Nd$ – розмір антени. На рис. 2 представлені результати розрахунку нормованої середньої ДС за потужністю (у дБ) антенної решітки з 21 випромінювачами з рівномірним (криві 1, 1') і косинусоїдальним ($p=1$) на підставці $\Delta=0,33$ (криві 2, 2') амплітудних розподілах з неоднорідними фазовими похибками першого (рис. 2, а) і другого (рис. 2, б) типів з параметрами $a=0,09$, $b=0,16$ (рад²) і відносними радіусами кореляції $C=10^{-3}$ (криві 1, 2) і $C=1$ (криві 1', 2'). Криві 3, 3' визначають нормовані середні ДС решітки з амплітудним розподілом косинус на підставці 0,33 відповідно з корельованими фазовими похибками $C=10^3$ та у відсутності їх.

Як видно з наведених графіків, неоднорідні фазові похибки в збуджені випромінювачів приводять, як і інші похибки, до згладжування ДС, ступінь якого залежить від статистики похибок.

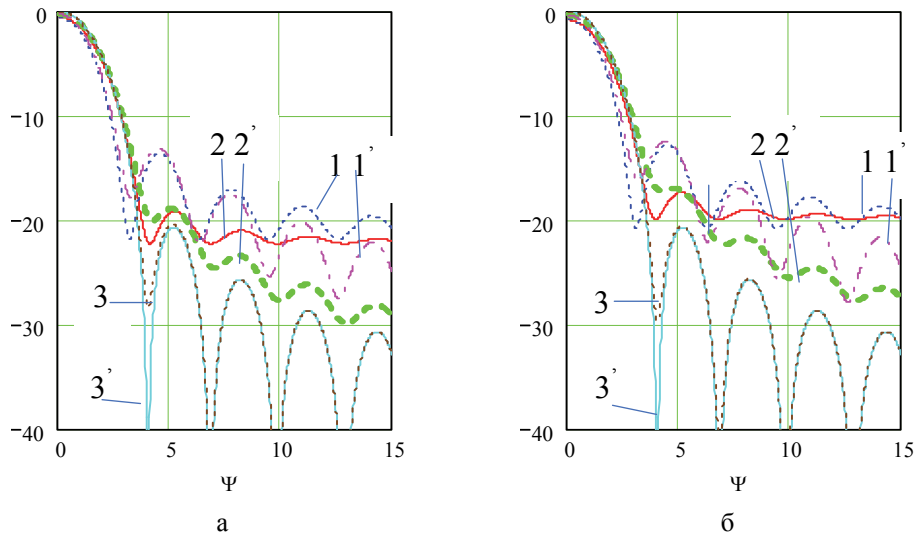


Рис. 2. Нормовані середні ДС за потужністю решітки з фазовими похибками:
а – першого типу; б – другого типу

Втім, є певні особливості в спотвореннях ДС, що притаманні неоднорідним похибкам. При рівномірному амплітудному розподілі неоднорідні фазові похибки зі зростаючою і убиваючою дисперсіями діють на середню ДС майже рівнозначно, в той же час при спадаючому амплітудному розподілі більш небезпечними є похибки другого типу. Це пояснюється тим, що спотворююча дія похибок першого типу з максимумом дисперсії на краях антени суттєво знижується із-за слабого збудження крайніх випромінювачів. Похибки другого типу мають максимальне значення дисперсії в області максимуму ам-

плітудного розподілу, що підсилює їх дію. Особливості виникають і для повністю корельованих неоднорідних похибок. При $C \rightarrow \infty$ середня ДС не співпадає з регулярною ДС, особливо в області її нульових випромінювань. Похибки другого типу викликають зменшене «запливання нулів», ніж зростаючі квадратичні фазові похибки.

Рис. 3–4 визначають зменшення середньої інтенсивності випромінювання в максимумі середньої ДС $|\overline{F(0)}|^2$ (у дБ) відносно інтенсивності випромінювання регулярної решітки.

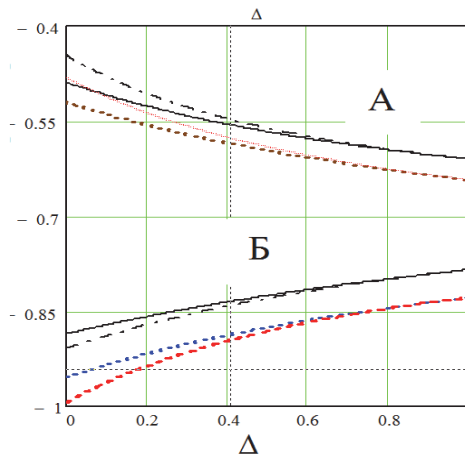


Рис. 3. Нормована середня інтенсивність в максимумі ДС для некорельованих похибок

На рис. 3 суцільні і штрих-пунктирні криві визначають залежності $|\overline{F(0)}|^2$ від значення підставки Δ комбінованого косинусоїдального ($p=1$) і косинусквадратного ($p=2$) амплітудних розподілів для некорельованих похибок першого (група А) і другого

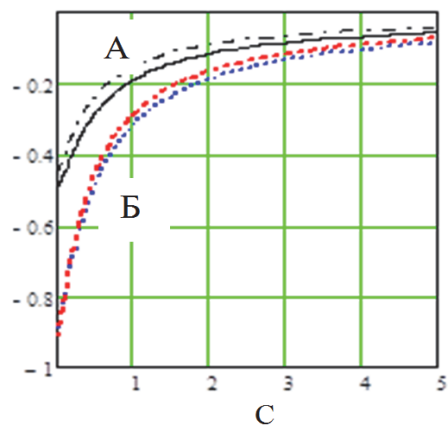


Рис. 4. Залежності нормованої середньої інтенсивності поля в максимумі ДС від відносного радіусу кореляції фазових похибок

(група Б) типу похибок. Поряд з цими кривими наведені графіки (пунктир, $p=1$, і штрих, $p=2$) інтенсивності в максимумах когерентних складових $|F_n(0)|^2$ нормованої середньої ДС (4). Вклад цих

складових в $\overline{|F(0)|^2}$, як витікає з рисунку, є основним і складає 98 % для похибок другого і 99 % першого типів. Значення інтенсивностей $\overline{|F(0)|^2}$, $|F_n(0)|^2$ для $p=1$ і $p=2$ слабо відрізняються, є незначні відмінності в області малих Δ . З наближенням амплітудного розподілу до рівномірного $\overline{|F(0)|^2}$ убуває для похибок першого типу і зростає для похибок другого типу, що пояснюється різницями в статистичних амплітудних розподілах. Другий тип похибок приводить до збільшення втрат в середніх інтенсивностях $\overline{|F(0)|^2}$.

Для визначення впливу кореляційних властивостей фазових похибок на рівень випромінювання в максимумі головної пелюстки на рис. 4 наведені графіки залежності інтенсивностей $\overline{|F(0)|^2}$ у дБ від величини відносного радіусу кореляції C для решітки з $N=21$ елемента з амплітудними розподілами $p=1, 2, \Delta=0$. Зі зростанням радіусу кореляції похибок інтенсивність $\overline{|F(0)|^2}$ збільшується і прагне при $C \rightarrow \infty$ до значень $-0,066$ ($p=1$, суцільна крива) і $-0,043$ ($p=2$, штрих-пунктир)) для похибок першого типу та $-0,034$ ($p=1$, пунктир) і $-0,018$ дБ ($p=2$, штрих) для похибок другого типу. Відзначимо, що для однорідних повністю корельованих фазових похибок середня інтенсивність дорівнює інтенсивності у відсутності похибок. Інтенсивність випромінювання для похибок другого типу менша (особливо в області малих радіусів кореляції), ніж для похибок першого типу, але уже при $C > 5$ відмінності між значеннями інтенсивностей майже відсутні. Найбільший приріст інтенсивності, особливо для похибок другого типу, спостерігається до $C=2$ (радіус кореляції $\rho_\phi=L$).

Висновки

Проведений аналіз дозволив виявити відмінності впливу на спрямовані характеристики ФАР неоднорідних і однорідних фазових похибок. Для неоднорідних фазових похибок на спрямовані характеристики еквівалентна зміні амплітудного розподілу: випромінювачі з більшою дисперсією похибок дають менший вклад у формування когерентної складової середньої ДС і збільшують рівень розсіяної потужності. Спотворення спрямованих характеристик неоднорідними фазовими похибками можна послабити шляхом зміни регулярного амплітудного розподілу і застосуванням схем побудови ФАР, які забезпечують підвищення кореляції похибок.

Список літератури

1. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Советское радио. 1970. – 384 с.
2. Шифрин Я.С. Статистика поля антенных решеток / Я.С. Шифрин, Л.Г. Корниенко // Антенны, 2000, – № 1. – С. 3-26.
3. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1966. – 728 с.
5. Инденбом М.В. Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции / М.В. Инденбом. – М.: Радиотехника, 2015. – 416 с.
6. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.

Надійшла до редколегії 13.03.2017

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

НАПРАВЛЕННЫЕ СВОЙСТВА ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СО СЛУЧАЙНЫМИ НЕОДНОРОДНЫМИ ФАЗОВЫМИ ПОГРЕШНОСТЯМИ

Л.Г. Корниенко, В.В. Кобзев, А.В. Коломийцев

Рассмотрена средняя диаграмма направленности линейных фазированных антенных решеток со случайными фазовыми погрешностями, которые имеют неоднородную дисперсию вдоль излучающей системы. Проанализированы результаты расчетов для линейных решеток с двумя законами изменения дисперсии фазового распределения. Выявлены различия в статистике поля решеток с однородными и неоднородными фазовыми погрешностями.

Ключевые слова: антенная решетка, амплитудно-фазовое распределение, однородные и неоднородные фазовые погрешности, дисперсия, радиус корреляции, средняя и регулярная диаграммы направленности, мощность рассеяния, статистическое амплитудное распределение.

DIRECTIONAL PROPERTIES OF PHASED ANTENNA ARRAY WITH RANDOM NON-UNIFORM PHASE ERRORS

L. Kornienko, V. Kobsev, O. Kolomytsev

Radiation pattern of linear phased antenna array with random non-uniform distribution of phase errors along radiating system was examined. Computation results of linear array's phase dispersion distribution were analysed. Differences in result of distribution of arrays with uniform and non-uniform phase errors were detected.

Keywords: array, amplitude-phase distribution, uniform and non-uniform phase errors, distribution, correlation radius, radiation pattern, lateral radiation, dissipation power, amplitude distribution.