

УДК 621.396.67

В.Д. Карлов¹, Н.Н. Петрушенко², Н.И.Свитенко³¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба²Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница³Метрологический центр военных эталонов, Харьков

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ В АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ НА ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ В СВЧ ТРАКТАХ ВЗАИМНЫМИ СВЯЗЯМИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Показаны основные допущения, принятые при синтезе математических моделей диаграмм направленности многоэлементных и малоэлементных антенных решеток. Приведены аналитические выражения для расчета зависимости коэффициентов отражений в высокочастотных трактах фазированной антенной решетки от числа излучателей в решетке и их координат. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что взаимные связи излучателей в малоэлементной решетке оказывают существенное влияние на коэффициенты отражения в высокочастотных трактах. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка (ФАР), коэффициент отражения, взаимные связи излучателей.

Введение

Постановка проблемы. Известно, что изменение коэффициентов отражения (КО) в сверхвысокочастотных (СВЧ) трактах является одним из проявлений влияния взаимных связей излучателей (ВСИ) на амплитудно-фазовое распределение (АФР) токов возбуждения антенны. При этом обратная волна на входах излучателей антенной решетки, порожденная ВСИ, оказывает влияние на режим работы генератора, как показано в [1] меняя энергетические характеристики антенны.

В настоящее время активно разрабатываются антенные решетки с небольшим числом излучателей, так называемые малоэлементные ФАР. Известно [2], что особенностью таких решеток является существенное влияние ВСИ на АФР токов возбуждения в антенне.

В связи с указанными причинами возникает необходимость в исследовании зависимости КО в трактах питания излучателей от параметров антенны.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ известной литературы [1, 3, 4] свидетельствует о том, что принятыми в настоящее время основными допущениями при синтезе математической модели многоэлементной антенной решетки (число излучателей $N \rightarrow \infty$), являются следующие.

Считают [5, 6] взаимные связи для "средних" излучателей равными и одинаково влияющими на токи возбуждения в излучателях решетки и на КО в трактах.

Кроме этого в таких решетках различиями в диаграммах направленности (ДН) "крайних" излучателей и КО в их трактах от ДН и КО в трактах "средних" излучателей пренебрегают, так как число

"крайних" излучателей ($5 \div 7$ крайних рядов по результатам экспериментов, описанных в [7]) намного меньше числа "средних" излучателей.

Эксперименты, описанные в [3, 8] свидетельствуют о необходимости учета отличий КО в различных каналах (здесь и далее термин «канал ФАР» подразумевает совокупность СВЧ устройств и отрезков трактов от входа распределительной системы до выхода излучателей) решетки при создании малоэлементных ФАР.

Цель статьи. Практика показала, что существующие методы СВЧ диагностики не обеспечивают необходимую точность для малоэлементных ФАР, поскольку указанные выше допущения являются слишком грубыми для данных решеток. Целью статьи является оценка влияния числа элементов в антенной решетке на КО в СВЧ трактах питания излучателей для уточнения областей применения известных методов диагностики.

Изложение основного материала

Известно [4, 7], что приведенные допущения позволяют ДН многоэлементной ФАР записать в виде:

$$F(\theta) = f_0(\theta)[1 - \Gamma_0(\theta)] \sum_i a_i(\theta) \exp[j\psi_i(\theta)], \quad (1)$$

где i, N — номера и число излучателей в решетке, $i \in 0, N-1$; $f_0(\theta)$ — общая (средняя) для всех излучателей ДН в составе решетки; $\Gamma_0(\theta)$ — общий (средний) для всех излучателей КО, обусловленный влиянием ВСИ; $a_i(\theta)$ — АФР токов возбуждения излучателей; $\psi_i(\theta)$ — разность фаз в излучателях за счет разности хода волны от центрального и i -го излучателя до точки наблюдения; θ — угол, отсчи-

тываемый от направления нормали к апертуре до направления на точку наблюдения.

В малоэлементных антенных решетках такая запись неприемлема. Это обусловлено тем, что КО $\Gamma_i(\theta)$ изменяются (в зависимости от θ) в каждом из каналов по-разному и различия зависят от координат излучателей в решетке и направления на точку наблюдения [3, 2]. ДН малоэлементной ФАР в этом случае можно представить в виде

$$F(\theta) = \sum_i a_i(\theta) f_i(\theta) [1 - \Gamma_i(\theta)] \exp[j\psi_i(\theta)]. \quad (2)$$

где $f_i(\theta)$ – ДН i -го излучателя в составе решетки; $\Gamma_i(\theta)$ – КО i -го канала.

В [2, 3] аналитически и экспериментально показано, что в малоэлементных ФАР $\Gamma_i(\theta)$ отличается от $\Gamma_0(\theta)$, однако не проанализированы зависимости $\Delta\Gamma_i(\theta) = \Gamma_i(\theta) - \Gamma_0(\theta)$ от номера излучателя i и числа излучателей N в антенной решетке. В связи с этим был выполнен расчет зависимостей $\Delta\Gamma_i(\theta)$ от i и N , при различных θ , по следующей методике.

Коэффициенты отражений $\Gamma_i(\theta)$ в каналах ФАР, обусловленные наличием ВСИ, рассчитываются по формуле [5]

$$\Gamma_i(\theta) = \sum_k C_{ik} \exp[j(\psi_i(\theta) - \psi_k(\theta))], \quad i, k \in 0, N-1, \quad (3)$$

где C_{ik} – коэффициенты матрицы рассеяния излучающей системы (ИС); $\psi_i(\theta) = 2\pi\lambda^{-1}id\sin(\theta)$ для дальней зоны исследуемой ФАР; d – расстояние между излучателями. Матрица рассеяния ИС в этом случае [6] записывается как

$$\mathbf{C} = (\mathbf{E} - \mathbf{Y})(\mathbf{E} + \mathbf{Y})^{-1},$$

где \mathbf{E} – единичная матрица.

Для получения формулы расчета C_{ik} воспользуемся [4, 6]. В [4] показано, что для щелевой антенной решетки взаимные проводимости могут быть рассчитаны по формуле

$$Y_{ik} = j \frac{1.64\lambda}{\pi(i-k)d} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\beta_i)\right)}{\sin(\beta_i)} \times \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\beta_k)\right)}{\sin(\beta_k)} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d(i-k)}, \quad (5)$$

$$i, k \in 0, N-1, \quad i \neq k,$$

где β_i и β_k – соответственно углы между радиус-вектором из одной щели в другую и продольными осями i -й и k -й щелей.

Поскольку взаимные сопротивления излучателей существенно зависят от геометрии ФАР (расстояния между ними, взаимного расположения) для определенности модели зададим расстояние между излучателями равным $d = 0,7\lambda$ и угол между осью волновода и щелями 60° .

Подставляя (5) в (4), были получены численные значения C_{ik} , и, используя формулу (3), рассчитаны КО в трактах излучателей при различном числе излучателей N для линейной щелевой решетки.

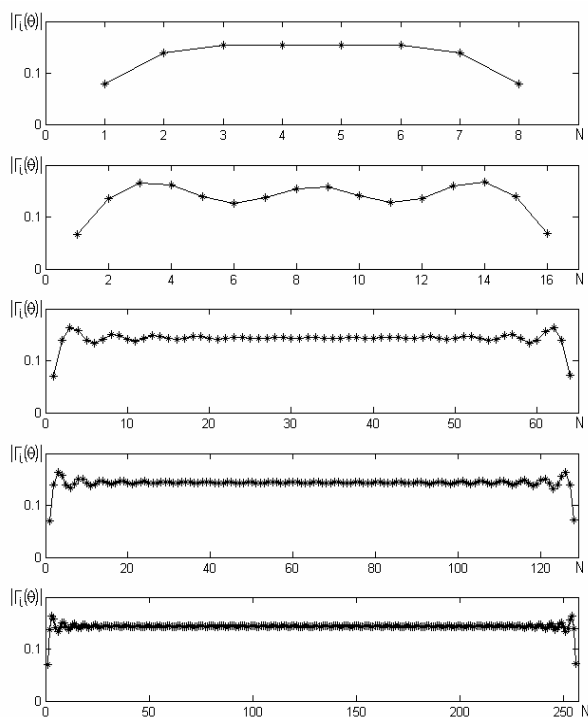


Рис. 1. Зависимость $|\Gamma_i(\theta)|$ от номера канала i и числа излучателей N

Результаты расчетов приведены на графиках (рис. 1, 2). На рис. 1 видна тенденция стремления $|\Gamma_i(\theta)|$ при увеличении N ($\theta = \text{const}$) к некоторому среднему значению $|\Gamma_0(\theta)|$, характерному для решеток с $N \rightarrow \infty$. Это явление объясняется следующим:

- эффективно взаимодействуют только 5-7 рядом расположенных излучателей [3, 4, 7];
- вследствие симметричности и периодичности антенной решетки коэффициенты матрицы рассеяния ИС имеют следующее свойства:

$$S_{ik} = \begin{cases} S_{ki}, & i, k \in 0, N-1; \\ S_{i'k'}, & \text{если } i-k = i'-k', \quad i', k' \in 0, N-1; \\ S_{i'k'}^*, & \text{если } i-k = -(i'-k'). \end{cases}$$

Из изложенного следует, что при расчете $\Gamma_i(\theta)$ для канала с номером i , соответствующего средней части полотна ФАР, участвует одинаковое число слагаемых слева и справа, с одинаковым набором амплитуд и фаз.

На рис. 2 приведена зависимость средней по каналам дисперсии отклонения множителя $(1 - |\Gamma_i(\theta)|)$ от своего среднего значения. Результаты расчетов (рис. 2) показывают, что более чувствительными к изменению направления сканирования являются малоэлементные решетки. В них почти на порядок изменяется значение выбранного показателя, в то время как в решетках с большим числом каналов дисперсия $(1 - |\Gamma_i(\theta)|)$ практически не изменяется. Таким образом, подтверждается используемое на практике допущение правомочности использования модели (1) для многоэлементной ФАР.

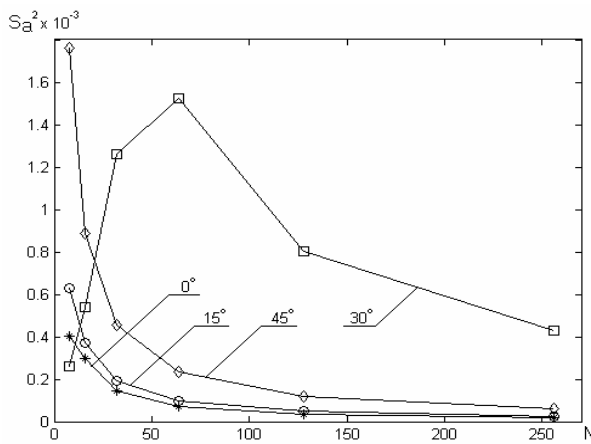


Рис. 2. Зависимость дисперсии отклонения множителя $[1 - |\Gamma_i(\theta)|]$ от своего среднего значения по каналам при изменении числа каналов в решетке для различных направлений сканирования θ

На рис. 2 также приведен график аномального изменения дисперсии отклонения множителя $[1 - |\Gamma_i(\theta)|]$ от своего среднего значения по каналам при угле сканирования 30° . Это явление резкого возрастания КО в каналах при определенных фазированиях получило в литературе название "эффект ослепления решетки". При этом энергетические показатели ФАР существенно ухудшаются, падающая волна СВЧ, подводимая к излучателям, не излучается в пространство, а отражается обратно к генератору. Указанное явление наблюдается при определенном фазовом распределении на полотне данной решетки и при изменении геометрических характеристик антенны может наблюдаться при других фазовых соотношениях.

Выводы

В малоэлементных решетках недопустимо считать КО от излучателей одинаковыми, не зависящими

от номера канала. В многоэлементных решетках ($N > 100$ в линейке излучателей) возможно считать КО от излучателей в каналах решетки одинаковыми, равными среднему значению этих величин.

При сканировании луча ФАР в малоэлементных решетках наблюдается сильное отклонение КО в каналах от своих средних значений, а при увеличении числа излучателей в решетке это отклонение стремится к нулю. В многоэлементных решетках КО в каналах зависит только от направления фазирования решетки и практически не зависит от номера канала.

Список литературы

1. Вендик О.Г. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес. – М.: Наука, 2001. – 252 с.
2. Tomasic B. Analysis of finite arrays – a new approach / B. Tomasic, A. Hessel // IEEE Trans. – March 1999. – AP, v. 47, N 3. – P. 137-141.
3. Амитей Н. Теория и анализ фазированных антенных решеток / Н. Амитей, В. Галиндо, Ч. Ву. – М.: Мир, 1974. – 455 с.
4. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ / Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
5. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1977. – Т. 2. – 408 с.
6. Сазонов Д.М. Основы матричной теории антенных решеток / Д.М. Сазонов // Сб. научно-методических статей по прикладной электродинамике. – М.: Выси. школа, 1983. – Вып. 6. – С. 111-162.
7. Бубнов Г.Г. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР / Г.Г. Бубнов, С.М. Никулин, Ю.Н. Серяков. – М.: Радио и связь, 1988. – 120 с.
8. Сканирующие антенные системы СВЧ: пер. с англ. / Под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. – М.: Сов. радио, 1969. – Т. 2. – 469 с.

Поступила в редколлегию 21.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Зима, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВПЛИВ ЧИСЛА ЕЛЕМЕНТІВ В АНТЕННІЙ РЕШІТЦІ НА ЗМІНУ КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ В НВЧ ТРАКТАХ ВЗАЄМНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, М.І. Світенко

Показано основні допущення прийняті при синтезі математичних моделей діаграм спрямованості багатоелементних і малоелементних антенних решіток. Наведено аналітичні вирази для розрахунку залежності коефіцієнтів відбиття у високочастотних трактах фазованої антенної решітки від числа випромінювачів у решітці і їхніх координат. Результати розрахунків свідчать про те, що взаємні зв'язки випромінювачів в малоелементній решітці істотно впливають на коефіцієнти відбиття в високочастотних трактах. Результати математичного моделювання добре погодяться з експериментальними даними.

Ключові слова: фазована антенна решітка, коефіцієнт відбиття, взаємні зв'язки випромінювачів.

AGENCY OF NUMBER OF ELEMENTS IN AN ANTENNA ARRAY ON VARIATIONS OF REFLECTION COEFFICIENTS IN UHF SECTIONS FROM RADIATORS CORRELATIONS

V.D. Karlov, N.N. Petrushenko, N.I. Svitenko

The basic assumptions accepted at synthesis of mathematical models of radiation pattern multi-element and low-element antenna arrays are shown. Analytical expressions for calculation of reflection coefficients dependence in microwave tracts of phased array from number of radiating elements in a array and their coordinates are demonstrated. Results of calculations testify that mutual couplings of elements essentially influence reflection coefficients in microwave tracts of low-element antenna arrays. Results of mathematical modelling will well be matched with experimental data.

Keywords: phased array, reflection coefficient, mutual coupling.