

УДК 621.396.67

В.Д. Карлов¹, О.А. Окунев¹, Н.Н. Петрушенко², Н.И. Свитенко³¹ Харьковський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків² Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница³ Метрологический центр военных эталонов, Харьков

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОЦЕНОК ОШИБОК ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МАЛОЭЛЕМЕНТНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Показана необходимость совершенствования методов диагностики технического состояния малоэлементных фазированных антенных решеток (ФАР). Приведены аналитические выражения для оценки ошибок функционирования электрически управляемых фазовращателей в составе ФАР методом дискретного преобразования Уолша с учетом взаимных связей излучателей. Результаты математического моделирования диагностики свидетельствуют о том, оценки ошибок фазовращателей обладают свойствами несмещенности и состоятельности.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, диагностика, фазовращатель.

Введение

Постановка проблемы. Контроль технического состояния ФАР стал важнейшей задачей при создании и эксплуатации современных РЛС. Он включает в себя проверку работоспособности и диагностику неисправностей элементов ФАР. Наиболее слабым звеном электрически управляемой решетки являются входящие в её состав фазовращатели (ФВ) [1]. При этом развитие перспективных малоэлементных ФАР требует совершенствования методов диагностики данных технических объектов.

Анализ последних исследований и публикаций. Как показано в [2], наиболее перспективными методами диагностики считаются методы, в которых в качестве измерительной антенны используется неподвижный зонд, расположенный в ближней или дальней зонах излучения исследуемой ФАР. К ним относятся [1 – 4]: коммутационный [3], модуляционный [4] методы, метод реконструктивной диагностики (МРД) [1] и метод дискретного преобразования Уолша (ДПУ) [2]. Для данных методов измеряемыми величинами являются отношения амплитуд и разность фаз между суммарным сигналом исследуемой антенны и контрольным сигналом генератора измерительной системы. Что соответствует измерению комплексного коэффициента передачи (КП) между ФАР и измерительным зондом (ИЗ).

В [1 – 4] показано, что оценки, получаемые модуляционным, коммутационным методом и методом МРД, смещены. Для компенсации смещения в [1, 3] предлагается осуществлять дополнительные измерения и использовать априорные сведения о ФВ. Эти методические погрешности связывают с использованием в рассматриваемых методах допущением об отсутствии взаимных связей излучателей (ВСИ) в антенной решетке.

Вместе с тем, для малоэлементных ФАР, влияние ВСИ является существенным [5]. Кроме того, такие решетки управляются прецизионными ФВ с точностью 4-6 разрядов [6]. Поэтому для диагностики таких ФВ указанные методы неприемлемы из-за погрешностей. Следует отметить, что метод ДПУ обеспечивает получение несмещенных оценок, но в его основе лежит математическая модель решетки без учета ВСИ [2].

Целью статьи является анализ влияния ВСИ в антенной решетке при диагностике ФВ методом дискретного преобразования Уолша и определение свойств оценок ошибок ФВ.

Изложение основного материала

Влияние ВСИ на амплитудно-фазовое распределение (АФР) токов в антенной решетке можно представить в виде изменяющихся в каждом из каналов при сканировании луча коэффициентов отражений (КО) в СВЧ трактах $\Gamma_i(\theta)$ [1]. ДН малоэлементной ФАР в этом случае можно представить в виде [7]

$$F(\theta) = \sum_i e_i \Phi_{in} f_i(\theta) [1 - \Gamma_i(\theta)] \exp[j\psi_i(\theta)]. \quad (1)$$

где e_i – АФР токов на выходе делителя мощности; $f_i(\theta)$ – ДН i -го излучателя в составе решетки; Φ_{in} – КП ФВ i -го канала в n -м состоянии ($n \in 0, L-1$, где L – множество состояний ФВ); $\psi_i(\theta)$ – разность фаз волн от центрального и i -го излучателей до точки наблюдения; θ – угол, отсчитываемый от направления нормали к апертуре до направления на точку наблюдения;

$\Gamma_i(\theta) = \sum_k C_{ik} \exp[j(\psi_i(\theta) - \psi_k(\theta))]$ – КО в каналах, обусловленные наличием ВСИ [8], ($i, k \in 0, N-1$);

C_{ik} – коэффициенты матрицы рассеяния антенной решетки, характеризующие КП между ее элементами.

Допустим, что исследуемая линейная ФАР функционирует в режиме передачи, а приёмный ИЗ находится в её ближней зоне излучения. При этом ИЗ находится на направлении нормали к апертуре. Поскольку зафиксирован угол $\theta = 0$, ниже в обозначениях зависимость от θ опущена.

Представим отклик ИЗ в виде

$$Y = \sum_i y_i,$$

где $y_i = x e_i \Phi_{in} f_i [1 - \Gamma_i] \rho_i$ – описывает «парциальный» отклик зонда на поле, формируемое i -м излучателем ФАР в месте расположения зонда ($i \in 0, N-1$); x – КА сигнала генератора, подключенного к ФАР; ρ_i – известная для данной измерительной системы оценка КП от входа i -го излучателя до выхода ИЗ.

Обозначим формируемые ФВ сдвиги фаз как $\Psi_{in} = n\psi_g$, $n \in 0, L-1$; где ψ_g – цена младшего разряда ФВ.

Ошибки ФВ, при переводе их в n -е состояние, определяются из соотношения

$$\xi_{in} = \Psi_{in} - n\psi_g,$$

где Ψ_{in} – фазовые сдвиги, реализуемые i -м ФВ в n -м состоянии, оцененные по результатам диагностики.

Все ФВ решетки поочередно одновременно переводятся в одно из $n \in 0, L-1$ состояний. Для каждого n -го состояния ФВ на апертуре ФАР теми же ФВ последовательно во времени реализуется прямое ДПУ в виде:

$$Y_{nr} = x \sum_i u_{ir} \Phi_{in} e_i f_i [1 - \Gamma_i] \rho_i + n_{nr}, \quad (2)$$

где $i, r \in 0, N-1$; $n \in 0, L-1$; u_{ir} – функции Уолша, и принимающие только два значения: $(+1)$ ($\psi_i = 0$) или (-1) ($\psi_i = \pi$); n_{nr} – КА шума при измерении Y_{nr} .

На выходе измерителя, оценивающего отношение КА, получаем

$$Y_{nr}^{\circ} = \sum_i u_{ir} \Phi_{in} e_i f_i [1 - \Gamma_i] \rho_i + n_{nr}^{\circ}, \quad (3)$$

где $Y_{nr}^{\circ} = Y_{nr} x^{-1}$; $n_{nr}^{\circ} = n_{nr} x^{-1}$.

Для выделения из-под знака суммы в (3) оценки вклада сигнала i -го канала в Y_{nr}° необходимо произвести процедуру обратного ДПУ:

$$\hat{y}_{in} = N^{-1} \sum_r Y_{nr}^{\circ} u_{ir} = y_{in} + \hat{n}_{in}, \quad (4)$$

где $\hat{n}_{in} = N^{-1} \sum_r n_{nr}^{\circ} u_{ir}$.

Преобразуем (4) к виду

$$\hat{y}_{in} = \Phi_{in} e_i f_i [1 - \Gamma_i] \rho_i [1 + \varepsilon_{in}],$$

где $\varepsilon_{in} = \hat{n}_{in} (\Phi_{in} e_i f_i [1 - \Gamma_i] \rho_i)^{-1}$ – отношение шум/сигнал в i -м канале ФАР при измерении фазового сдвига n -го состояния ФВ.

Отношения отклика измерительного зонда на излучение из i -го канала при переводе всех ФВ в n -е состояние \hat{y}_{in} к отклику того же канала при переводе всех ФВ в исходное (нулевое) состояние \hat{y}_{i0} равно

$$\frac{\hat{y}_{in}}{\hat{y}_{i0}} = \frac{\Phi_{in} e_i f_i [1 - \Gamma_i(\Psi_{in})] (1 + \varepsilon_{in})}{\Phi_{i0} e_i f_i [1 - \Gamma_i(\Psi_{i0})] (1 + \varepsilon_{i0})}, \quad (5)$$

где $\Gamma_i(\Psi_{in})$, $\Gamma_i(\Psi_{i0})$ – коэффициенты отражения в i -м канале ФАР при переводе всех ФВ решетки в n -тое и нулевое состояние, соответственно.

В случае малых $\xi_{in} \leq \psi_g$ величина

$$\gamma_{in} = 1 - \Gamma_i(\Psi_{in}) = 1 - \sum_k C_{ik} (1 + \xi_{kn}) (1 - \xi_{in}) \approx 1 - \sum_k C_{ik}.$$

Тогда $\gamma_{in} \gamma_{i0}^{-1} \approx 1$ и формулу (5) запишем как

$$\frac{\hat{y}_{in}}{\hat{y}_{i0}} = \frac{\Phi_{in} (1 + \varepsilon_{in})}{\Phi_{i0} (1 + \varepsilon_{i0})} \approx \exp[j(\Psi_{in} - \Psi_{i0})], \quad (6)$$

где $\Psi_{in} = n\psi_g + \xi_{in}$.

Необходимо отметить, что величины Ψ_{i0} выбираются из технической документации на ФВ.

Из (6) следует, что оценки ξ_{in} равны

$$\hat{\xi}_{in} = \arg[\hat{y}_{in} (1 + \varepsilon_{i0})] - \arg[\hat{y}_{i0} (1 + \varepsilon_{in})] - n\psi_g + \xi_{i0} \approx \xi_{in},$$

где учтено, что при больших отношениях сигнал/шум $|\varepsilon_{in}| \ll 1$, $\arg(\hat{y}_{in}) = n\psi_g + \xi_{in}$, а

$\arg(\hat{y}_{i0}) = \xi_{i0}$. Анализ данного соотношения свидетельствует о том, что полученные оценки ошибок $\hat{\xi}_{in}$ являются несмещенными и состоятельными.

Особенность рассматриваемого метода состоит в том, что он позволяет определять ошибки ФВ, находящихся в канале решетки так, как будто они изолированы от влияния токов в других каналах. Это возможно потому, что КО в одном и том же канале, при фазировании антенны в одном и том же направлении, переводом всех ФВ в одно из состояний, одинаковое для всех каналов, отличается на малые величины, обусловленные произведением малых ошибок ФВ $\xi_{in} \leq \psi_g$ на малые коэффициенты $C_{ik} \ll 1$.

Для подтверждения несмещенности и состоятельности оценок ошибок фазовых сдвигов ξ_{in} , получаемых предлагаемым методом, проведено математическое моделирование диагностики восьмиэлементной ФАР с равномерным АФР токов возбуждения. Расчет АФР токов возбуждения решетки с учетом ВСИ проводился согласно [9]. Имитировался процесс диагностики ФАР для двух вариантов.

В первом варианте использовалась модель решетки, учитывающая ВСИ, а во втором - классическая модель без учета ВСИ. Расчеты проводились при различных отношениях сигнал/шум для решеток с различной геометрией ($d/\lambda = 0,6$ и $d/\lambda = 0,7$). Для каждого значения отношения сигнал/шум расчеты осуществлялись не менее ста раз при различных реализациях шума измерений, распределенного по нормальному закону с нулевым средним. Результаты статистической обработки оценок ошибок фазовых сдвигов ξ_{in} приведены на рис. 1.

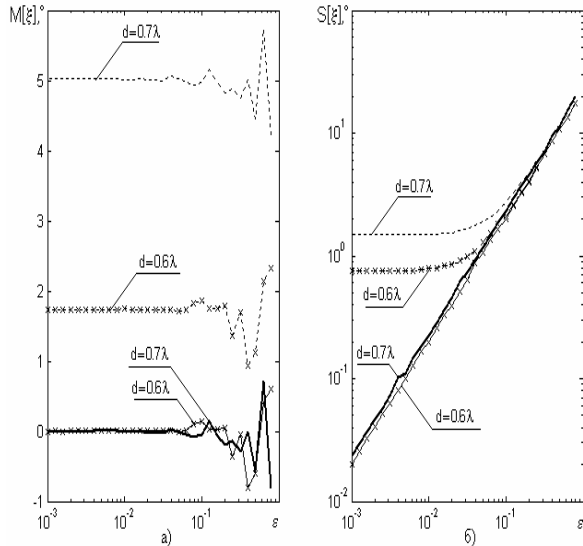


Рис. 1. Результаты математического моделирования диагностики ФАР

По оси абсцисс на графиках отложено отношение шум/сигнал. На рис. 1, а представлены результаты расчетов математического ожидания оценок, а на рис. 1, б – результаты расчетов среднего квадратического отклонения (СКО) оценок. Прерывистой линией обозначены оценки, полученные без учета ВСИ, а сплошной – оценки, полученные с учетом ВСИ в модели решетки. Крестиками обозначены графики для решетки с $d/\lambda = 0,6$.

Результаты моделирования указывают на зависимость результатов диагностики от КА шума измерений. Вместе с тем при уменьшении шума ниже некоторого порога влияние ВСИ на оценки ошибок ФВ приобретает доминирующую роль. При этом результаты диагностики без учета ВСИ демонстрируют смещение оценок относительно объективно существующих ошибок ФВ, а результаты диагностики с учетом ВСИ – стремление математического отклонения оценок к нулю, то есть несмещенность оценок.

Графики СКО оценок ошибок фазовых сдвигов показывают, что пренебрежение учетом ВСИ в модели решетки приводит к невозможности определения ошибок функционирования ФВ на фоне искажений АФР токов возбуждения ВСИ. Увеличение

отношения сигнал/шум при измерениях в этом случае не влияет на результаты диагностики, поскольку СКО оценок определяется изменениями токов, вызванными ВСИ.

Однако необходимо отметить, что оценки ξ_{in} будут несмещенными и состоятельными только в том случае, если прямое ДПУ ФВ решетки реализуется без ошибок или эти ошибки априори известны. В противном случае, произведение матриц прямого ДПУ, реализованного ФВ решетки и обратного, реализованного ЭВМ при обработке данных эксперимента, не будет равняться единичной матрице, что и приведет к смещению оценок.

Выводы

Теоретический анализ свойств оценок ошибок ФВ при диагностике малоэлементных ФАР, а также результаты математического моделирования показали, что диагностика ФВ методом ДПУ с учетом ВСИ позволяет получить оценки ошибок ФВ обладающие свойствами несмещенности и состоятельности.

Список литературы

1. Воронин Е.Н. Реконструктивные антенные измерения / Е.Н. Воронин, Е.Е. Нечаев, В.Ф. Шашенков. – М.: Наука, 1995. – 352 с.
2. Шифрин Я.С. Бесфазовые методы диагностики фазированных антенных решеток / Я.С. Шифрин, У.Р. Лиетинь // Антенны. – 2000. – Вып. 1 (44). – С. 84-99.
3. Бубнов Г.Г. Коммутационный метод измерения характеристик ФАР / Г.Г. Бубнов, С.М. Никулин, Ю.Н. Серяков. – М.: Радио и связь, 1988. – 120 с.
4. Леманский А.А. Восстановление распределения поля в раскрыве решетки модуляционным способом / А.А. Леманский, В.С. Рабинович, В.Г. Соколов // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, вып.3. – С. 616-620.
5. Карлов В.Д. Влияние числа элементов в антенной решетке на изменения коэффициентов отражения в СВЧ трактах взаимными связями излучателей / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, Н.И. Свитенко // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: XV ПС, 2009. – Вип. 1 (75). – С. 56-58.
6. Понтер В. Приемопередающий модуль для АФАР / В. Понтер, С. Аржанов, А. Баров // Аэрокосмический курьер. – 2006. – № 3. – С. 22-24.
7. Лиетинь У.Р. Метод измерения диаграмм направленности излучателей в составе ФАР / У.Р. Лиетинь, Н.И. Свитенко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 7. – С. 10-14.
8. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1977. – Т. 2. – 408 с.
9. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн / Г.А. Лавров. – М.: Связь, 1975. – 128 с.

Поступила в редколлегию 2.04.2009

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

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОЦІНОК ПОМИЛОК ФАЗООБЕРТАЧІВ
ПРИ ДІАГНОСТИЦІ МАЛОЕЛЕМЕНТНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК**

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

Показано необхідність удосконалювання методів діагностики технічного стану малоелементних фазованих антенних решіток (ФАР). Наведено аналітичні вирази для оцінки помилок функціонування електрично керованих фазообертачів у складі ФАР методом дискретного перетворення Уолша з урахуванням взаємних зв'язків випромінювачів. Результати математичного моделювання діагностики свідчать про те, що оцінки помилок фазообертачів мають властивості незміщеності й достовірності.

Ключові слова: фазована антенна решітка, діагностика, фазообертач.

**RESEARCH OF PROPERTIES OF ESTIMATIONS OF ERRORS OF PHASE SHIFTERS
AT DIAGNOSTICS LOW-ELEMENT OF THE PHASED ANTENNA LATTICES**

V.D. Karlov, O.A. Okunev, N.N. Petrushenko, N.I. Svitenko

Necessity of perfection of diagnostics methods of a technical state of low-element antenna arrays is shown. Analytical expressions for an estimation of errors of functioning electrically-operated phase shifters as a part of phased array by a method of Walsh discrete transformation taking into mutual couplings of radiators are resulted. Results of mathematical modelling of diagnostics testify to that, estimations of errors of phase shifters possess properties unbiasedness and a consistency.

Keywords: phased array, diagnostic, phase shifter.