

УДК 621.396.677.494

В.Н. Куприй<sup>1</sup>, Г.А. Головин<sup>2</sup>, Д.А. Гриб<sup>1</sup>, И.М. Невмержицкий<sup>1</sup>, П.А. Коваленко<sup>1</sup>, А.А. Гризо<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба<sup>2</sup>В/ч А-4489 «Б»**АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ***Предлагается план организации измерений разности фаз между излучателями приемной антенной решетки, позволяющий получить несмещенные и состоятельные оценки конструкции решетки.**антенные измерения, калибровка антенных решеток***Введение**

Современные методы пеленгации источников радиоизлучений базируются на методах пространственного спектрального анализа, использующих разложение корреляционной матрицы принятой антенной решеткой смеси сигналов на собственные числа и векторы, принадлежащие подпространствам сигналов и шумов [1]. Это позволяет решать задачи пеленгации в режиме сверхразрешения. Однако, одним из неперемных условий реализации различных методов сверхразрешения является наличие априорных сведений о состоянии конструкции антенной решетки (АР) и ее амплитудно-фазовом распределении (АФР), формирующем на выходах аналого-цифровых преобразователей (АЦП) вектор отклика АР  $\mathbf{a}(\theta)$ , на сигнал, принятый с направления  $\theta$ . В [2, 3] показано, что точность пеленгации источников радиоизлучений (ИРИ) зависит от соответствия модели отклика  $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$ , используемого в алгоритмах сверхразрешения, действительному отклику решетки  $\mathbf{a}(\theta)$ .

Для максимально возможного сближения модели  $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$  и реализованного  $\mathbf{a}(\theta)$ , используются различные методы калибровки АР, заключающиеся в определении  $\Delta\mathbf{a}(\theta) = \mathbf{a}(\theta) - \hat{\mathbf{a}}(\theta)$  и введение коррекции в  $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$ , приближающее  $\Delta\mathbf{a}(\theta)$  к нулю.

**Анализ литературы.** Основными причинами, порождающими отклонение вектора волнового фронта принятого сигнала  $\mathbf{a}(\theta)$  от модели  $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$ , являются искажения АФР в решетке вследствие неидентичности каналов приема, эффектов взаимной связи излучателей (ВСИ), а также отклонения координат элементов АР от их расчетных (номинальных) значений.

Основной процедурой калибровки (если координаты источников контрольных сигналов (КС) известны) и автокалибровки (координаты ИРИ КС неизвестны) является определение истинных координат излучателей в решетке [4] и отклонения их от расчетных. Причина в том, что эта информация необходима для компенсации дефектов АФР, возни-

кающих как вследствие искажения конструкции АР, так и вследствие ВСИ. В [4] в качестве КС используются сигналы излучения (переизлучения) пеленгуемых источников. Они, как правило, удалены от АР на большие расстояния. Это приводит к тому, что фронты КС искажаются средой распространения радиоволн (РРВ). Особенно заметны такие эффекты в метровом и дециметровом диапазонах волн [5].

Другим недостатком метода автокалибровки, описанного в [4], является то, что процесс калибровки совмещен с процедурами определения направлений прихода (НП) сигналов и оценки их комплексных амплитуд (КА). Для устранения указанных выше недостатков в статье предлагается метод калибровки по источнику КС, располагающемуся на ближней границе дальней зоны или в ближней зоне. Координаты источника КС считаются известными.

**Постановка задачи.** Калибровке подлежит двумерная плоская АР, апертура которой расположена в плоскости  $XOY$  сферической системы координат. Источник КС расположен на направлении орта  $\vec{\mathbf{u}} = \vec{\mathbf{x}}^\circ \sin \theta \cos \varphi + \vec{\mathbf{y}}^\circ \sin \theta \sin \varphi + \vec{\mathbf{z}}^\circ \cos \theta$ , где  $\theta, \varphi$  – углы сферической системы координат, рис. 1.

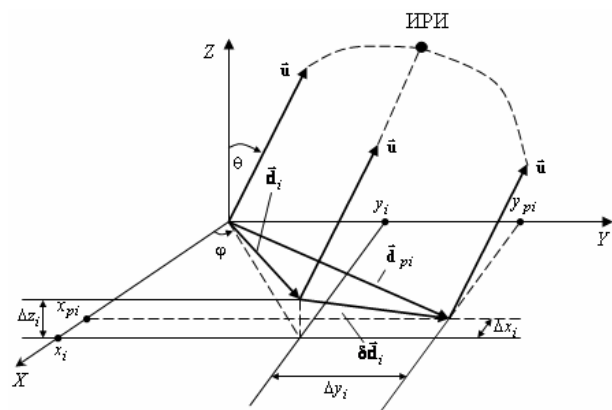


Рис. 1. Схема размещения АР и источника КС (ИРИ)

Для упрощения записей представим

$$\vec{\mathbf{u}} = \vec{\mathbf{x}}^\circ \cos \theta_x + \vec{\mathbf{y}}^\circ \cos \theta_y + \vec{\mathbf{z}}^\circ \cos \theta,$$

где  $\cos \theta_x = \sin \theta \cos \varphi$ ,  $\cos \theta_y = \sin \theta \sin \varphi$ ,  $\cos \theta$  – направляющие косинусы.

Введем в рассмотрение вектор  $\vec{d}_i$ , соединяющий начало координат в АР с  $i$ -м излучателем. Набег фазы между началом отсчета фазы и  $i$ -м излучателем тогда

$$\varphi_i = k(\vec{a} \vec{d}_i^T), \quad (1)$$

где  $\vec{d}_i = \vec{x}^\circ x_i + \vec{y}^\circ y_i + \vec{z}^\circ z_i$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $x_i, y_i, z_i$  – декартовы координаты  $i$ -го излучателя;  $(\cdot)$  – скалярное произведение векторов.

Если излучатели размещены с ошибками, т.е.  $x_i = x_{pi} + \Delta x_i$ ;  $y_i = y_{pi} + \Delta y_i$ ;  $z_i = \Delta z_i$ , то  $\vec{d}_i = \vec{d}_{pi} + \delta \vec{d}_i$ , где  $x_{pi}, y_{pi}$  – расчетные координаты излучателя,

$$\delta \vec{d}_i = \vec{x}^\circ \Delta x_i + \vec{y}^\circ \Delta y_i + \vec{z}^\circ \Delta z_i. \quad (2)$$

Разность набегов фаз (между расчетным набегом фаз и действительным)

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \varphi_{pi} - \varphi_i = k\vec{u}(\vec{d}_{pi} - \vec{d}_i)^T = k\vec{u}\delta \vec{d}_i^T = \\ &= \Delta x_i \cos \theta_x + \Delta y_i \cos \theta_y + \Delta z_i \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Слева в (3) разность фаз  $\Phi_i$ , которая может быть реконструирована по разности между измеренным значением  $\varphi_i$  и рассчитанным значением  $\varphi_{pi}$ , полученным из (1) при  $\vec{d}_i = \vec{d}_{pi}$  и известной длине волны КС  $\lambda$ . Справа три неизвестных величины  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ . Следовательно, для решения (3), необходимо провести как минимум три измерения  $\Phi_i$  под разными углами, определяемыми  $\vec{u}$ .

### Основная часть

Для формирования системы измерительных уравнений запишем отклик каждого канала АР на КС [4]

$$y_i(\vec{u}) = x_c I_i [1 - \Gamma_i(\vec{u})] \exp[j\varphi_i(\vec{u})], \quad (4)$$

где  $i \in 0, N-1$ ;  $N$  – число излучателей в АР;  $x_c$  – КА КС;  $I_i$  – коэффициент передачи СВЧ тракта  $i$ -го излучателя;  $\Gamma_i(\vec{u})$  – коэффициент отражения в тракте  $i$ -го излучателя;

$$\varphi_i(\vec{u}) = k\tau_0 + k[\vec{u}\vec{d}_i^T], \quad (5)$$

где  $k\tau_0$  – набег фазы на расстоянии  $\tau_0$  – расстоянии от ИРИ до центра апертуры АР.

Воспользуемся теми же допущениями, что и в [4]. Излучатели будем считать изотропными, а  $I_i \approx I$ . Если длина волны КС  $\lambda = 2d$ , то взаимными связями можно пренебречь, так как взаимные сопротивления изотропных излучателей [6]

$$R_{in} = \frac{\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}d(i-n)\right]}{\frac{2\pi}{\lambda}d(i-n)}, \quad i, n \in 0, N-1, \quad (6)$$

равны нулю при  $\lambda = 2d$ .

В этом случае выражение (4) приобретает вид

$$y_i(\vec{u}) = x_c I \exp[j\varphi_i(\vec{u})]. \quad (7)$$

Далее будем считать, что оценка  $y_i$  производится амплифазометром типа ФК-33, измеряющем отношения откликов в  $i$ -м и опорном каналах. В качестве опорного выберем канал с номером  $i = 0$  (в центре апертуры). Тогда на выходе амплифазометра будем иметь цифровой код

$$y_i^\circ(\vec{u}) = \frac{y_i(\vec{u})}{y_0(\vec{u})} = \exp\{j[\varphi_i(\vec{u}) - \varphi_0(\vec{u})]\}. \quad (8)$$

Используя (1), (5) можно записать, что

$$\arg y_i^\circ(\vec{u}) = k[\vec{u}\vec{d}_i^T], \quad (9)$$

т.е. величины  $\arg y_i^\circ(\vec{u})$  представляют собой распределение разности фаз в решетке.

Не трудно показать, что, если  $x_{pi} = id$ ,

$y_{pi} = 0$ ,  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ , то

$$\varphi_{pi} = kid \sin \theta \cos \varphi = kid \cos \theta_x.$$

При отклонении конструкции АР от расчетной, разность  $\Phi_i$  приобретает вид соотношения (3). Если источник КС расположен в дальней зоне исследуемой АР и измерения  $\varphi_i$ , а также реконструкция  $\Phi_i$ , производится при размещении этого источника на направлениях  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3$  (при  $\tau_0 = \text{const}$ ), то система уравнений измерения и реконструкции приобретает вид

$$\mathbf{M}\Delta_i + \mathbf{n}_i = \Phi_i, \quad (10)$$

где  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{x1} & \cos\theta_{y1} & \cos\theta_1 \\ \cos\theta_{x2} & \cos\theta_{y2} & \cos\theta_2 \\ \cos\theta_{x3} & \cos\theta_{y3} & \cos\theta_3 \end{bmatrix}$ ;  $\Delta_i^T = [\Delta x_i \ \Delta y_i \ \Delta z_i]$ ;

$\Phi_i^T = [\Phi_{1i} \ \Phi_{2i} \ \Phi_{3i}]$ ;  $\mathbf{n}_i^T = [n_{1i} \ n_{2i} \ n_{3i}]$ ;  $\mathbf{n}_i$  – матрица ошибок измерения  $\varphi_i$  и реконструкции  $\Phi_i$ .

Моделями случайных величин  $\mathbf{n}_i$  и  $\Delta_i$ , описывающих соответственно аддитивные ошибки измерения  $y_i$  и восстанавливаемые ошибки  $\Delta_i$ , имеющими широкую практическую применимость, являются гауссовские случайные величины со средними значениями, равными нулю. В таком случае оценка вектора  $\Delta_i$ , полученная методом наименьших квадратов (МНК) [7], имеет вид

$$\hat{\Delta}_i = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \Phi_i. \quad (11)$$

Оценки по МНК для линейной модели  $\mathbf{M}\Delta_i + \mathbf{n}_i = \Phi_i$  обладают такими свойствами [7]:

1) оценки по МНК являются несмещенными и состоятельными;

2) оценки  $\Delta_i$  являются оценками максимального правдоподобия.

При размещении источника КС в ближней зоне (10) и (12) можно записать в виде:

$$\mathbf{M}_i \Delta_i + \mathbf{n}_i = \Phi_i; \quad (12)$$

$$\hat{\Delta}_i = (\mathbf{M}_i^T \mathbf{M}_i)^{-1} \mathbf{M}_i^T \Phi_i, \quad (13)$$

где 
$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{x1i} & \cos \theta_{y1i} & \cos \theta_{z1i} \\ \cos \theta_{x2i} & \cos \theta_{y2i} & \cos \theta_{z2i} \\ \cos \theta_{x3i} & \cos \theta_{y3i} & \cos \theta_{z3i} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Способы уменьшения дисперсии

$$\sigma_{\Delta}^2 = (\hat{\Delta}_i - \Delta_i)^2$$

путем выбора оптимальных значений удаления источника КС от АР  $r_0$  и оптимальных значений  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  – предмет дальнейших исследований.

### Заключение

Разработан метод организации измерения разности фаз в исследуемой АР, позволяющий восстановить искажения конструкции решетки. Показано, что, если ошибки измерения разности фаз и смещение излучателей в решетке, распределены по нормальному закону с нулевым средним, то полученные предлагаемым методом оценки смещения излучателей являются несмещенными и состоятельными.

### Список литературы

1. Hamid Krim and Mats Viberg *Two Decades of Array Signal Processing Research // IEEE Signal Processing Magazine July 1996.* – P. 67-94.
2. Stoica P. and Nehorai A. *MUSIC, Maximum Likelihood and Cramer-Rao Bound. // IEEE Trans. ASSP, ASSP-37:720-741, May 1989.* – P. 120-124.
3. Stoica P. and Nehorai A. *MUSIC, Maximum Likelihood and Cramer-Rao Bound: Further Results and Comparisons. // IEEE Trans. ASSP, ASSP-38:2140-2150, December 1990.* – P. 352-357.
4. Solomon I. S. D., Gray D. A., Abramovic Y. M., Anderson S. I. *Receiver Array calibration using disparate sources // IEEE Trans. Sign. Proc., 1999. Vol. 47, N3.* – P. 496-505.
5. Солодовников Г.К., Новожилов В.И., Фаткулин М.Н. *Распространение радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосфере.* – М.: ИЗМИР АН СССР, Наука, 1990. – 230 с.
6. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ.* – М., Высш. шк., 1988. – 432.
7. Марпл-мл. С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1990. – 584 с.

Поступила в редколлегию 24.04.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.