

УДК 621.396.677.494

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, Н.Н. Петрушенко<sup>2</sup>, Г.А. Головин<sup>3</sup>, О.В. Бесова<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Главная инспекция Министерства обороны Украины, Киев<sup>3</sup>Войсковая часть А0156

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА АНТЕННОМ ПОЛИГОНЕ

Рассматривается метод определения числа и направления прихода помеховых сигналов в условиях проведения экспериментальных исследований характеристик направленности антенны в районе ее дислокации. Проанализирован случай, когда помеховые сигналы образуются в результате отражения эхо-сигналов, излучаемых исследуемой антенной от земной поверхности, а решетка измерительных зондов расположена в дальней зоне. Обосновано, что в рассматриваемом случае для определения количества дискретных источников помеховых сигналов, возникающих на трассе распространения радиоволн между исследуемой антенной и решеткой измерительных зондов, достаточно одной вертикальной линейкой эквидистантной решетки приемных зондов. Приведены результаты моделирования конкретной помеховой обстановки на антенном полигоне.

**Ключевые слова:** антенные измерения, помеховые сигналы, характеристики направленности антенны, антенный полигон.

### Введение

Экспериментальные исследования характеристик направленности антенны в районе ее дислокации в большинстве практически важных случаев затруднены проблемой устранения влияния эхо-сигналов (ЭС), образованных переотражениями зондирующих сигналов (ЗС) от земли и местных предметов. Применительно к рассматриваемому случаю такие переотражения носят характер помеховых сигналов, существенно влияющих на качество проведения экспериментального исследования характеристики направленности исследуемой антенны. По этой причине в последние годы усиленно развивается направление антенных измерений (АИ), связанное с усовершенствованием методов обработки результатов измерений параметров антенн с целью снижения влияния подобного рода помеховых сигналов на точность оценок как внешних, так и внутренних характеристик антенн.

**Анализ публикаций.** Одними из первых работ, в которых оценены достигнутые в настоящее время результаты исследований в этом вопросе и намечены примерные направления дальнейших исследований, являются [1, 2]. Авторы этих работ предлагают при восстановлении (реконструкции) внешних характеристик антенн использовать реконструктивные

методы, которые подразумевают использование цифровых методов коррекции результатов измерений, позволяющих устранить или ослабить влияние ошибок измерительно-вычислительного комплекса на точность восстановления характеристик исследуемых антенн. При этом к ошибкам диагностического комплекса в [1, 2] отнесены также ошибки реконструкции ДН, обусловленные воздействием рассматриваемых помеховых сигналов (ПС). В этих работах, в качестве альтернативы методам снижения влияния ПС на полигонах, где проводится исследование антенн (назовем их антенными полигонами), предлагается производить предварительное радиозондирование полигона с целью определения априорных данных о помеховой обстановке и использования их для коррекции результатов измерений.

Практическая реализация априорного зондирования антенного полигона предполагает решение задач получения оценок:

числа источников ПС;

направлений прихода (НП) ПС и дальности до их источников, если измерение производится в ближней зоне.

Каждая из перечисленных выше задач достаточно сложная и требует применения самых современных методов пространственно-временной обработки сигналов. В [2] сделано предположение о пер-

спективности использования для решения задач априорного зондирования методов и алгоритмов пространственного спектрального анализа.

Целью статьи является разработка методики оценки помеховой обстановки на антенном полигоне.

### Основной материал

Рассмотрим случай, когда исследуемая антенна функционирует в режиме передачи, а решетка измерительных зондов (РИЗ) расположена в ее дальней зоне. Допустим, что единственным источником образования ПС является земная поверхность. Тогда для определения количества дискретных (разделяющихся) источников ПС, формируемых земной поверхностью на трасе распространения радиоволн между исследуемой антенной и РИЗ, достаточно одной вертикальной линейной эквидистантной решетки приемных зондов. При этом РИЗ должна иметь аппаратуру, позволяющую оцифровывать смеси сигналов, принятых каждым из зондов, формировать корреляционную матрицу (КМ) смеси. Необходим также процессор, позволяющий определять собственные числа КМ. В качестве алгоритмов, формирующих оценки числа источников ПС на антенном полигоне, выбираем статические тесты Акаике (AIC) минимальной длины (MDL) [3, 4].

Если обозначить через  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L$  собственные числа  $\tilde{\mathbf{H}}$  в убывающем порядке, то алгоритмы AIC и MDL, используемые для оценки числа источников ПС, принятых РИЗ, описываются выражениями [4, 8]

$$AIC(u) = -M \ln \left\{ \frac{\prod_{i=u+1}^L \gamma_i}{\left[ \frac{1}{L-u} \sum_{i=u+1}^L \gamma_i \right]^{L-u}} \right\} + u(2L-u), \quad (1)$$

$u \in 0, L-1;$

$$MDL(u) = -M \ln \left\{ \frac{\prod_{i=u+1}^L \gamma_i}{\left[ \frac{1}{L-u} \sum_{i=u+1}^L \gamma_i \right]^{L-u}} \right\} + \frac{1}{2} u(2L-u) \ln M, \quad u \in 0, L-1, \quad (2)$$

где  $M$  – число выборок при формировании КМ.

Число  $u$ , при котором  $AIC(u)$  или  $MDL(u)$  принимают минимальные значения, соответствует оценке числа источников  $\hat{V}$ .

Необходимо отметить, что декорреляцию сигналов, принятых РИЗ, можно достичь, реализуя при сглаживании усреднения «вперед – назад». В этом случае сглаженная КМ представляется в виде суммы [5]

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (\mathbf{H}_k + \hat{\mathbf{H}}_k); \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}_k = \langle \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^H \rangle$ ;  $\hat{\mathbf{H}}_k = \langle \mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^H \rangle$ ;  $\mathbf{Z}_k = \mathbf{E}_L \mathbf{Y}_k^*$ ; (4)

$\mathbf{E}_L$  –  $L \times L$  матрица перестановок, содержащая единицы в побочной диагонали и нули в остальных позициях;  $\mathbf{Y}_k$  – вектор входных сигналов  $k$ -ой подрешетки.

После выполнения процедур (3), (4) получим, что

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{A} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_L, \quad (5)$$

где

$$\tilde{\mathbf{C}} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left\{ \Phi^{k-1} \mathbf{C} (\Phi^{k-1})^H + \Phi^{2-L-k} \mathbf{C}^* (\Phi^{2-L-k})^H \right\}. \quad (6)$$

Учитывая ожидаемую корреляцию между сигналами, матрицу  $\mathbf{C}$  представим в виде

$$C_{u,v} = \sigma_u \sigma_v \rho_{uv}, \quad u, v \in 1, V,$$

где  $\sigma_u^2$  – мощность  $u$ -го сигнала в тракте каждого зонда.

В данной статье моделировалась ситуация, когда количество источников  $V=7$ , а АФР в РИЗ известно с точностью до 10-3 рад по фазе и 0,1% по относительной амплитуде. На графиках рис. 1 представлены оценки числа источников излучения полностью коррелированных сигналов ( $\rho_{uv} = 1$ ) 16-ти элементной РИЗ, полученные при помощи алгоритма MDL. Штрих-пунктирной линией показана оценка числа источников без применения декорреляции принятых сигналов, а сплошной – с применением декорреляции. Количество подрешеток, используемых при декорреляции  $K=6$ ; число каналов в подрешетках  $L=11$ . Из-за применения усреднения «вперед – назад», количество подрешеток искусственно увеличивается вдвое.

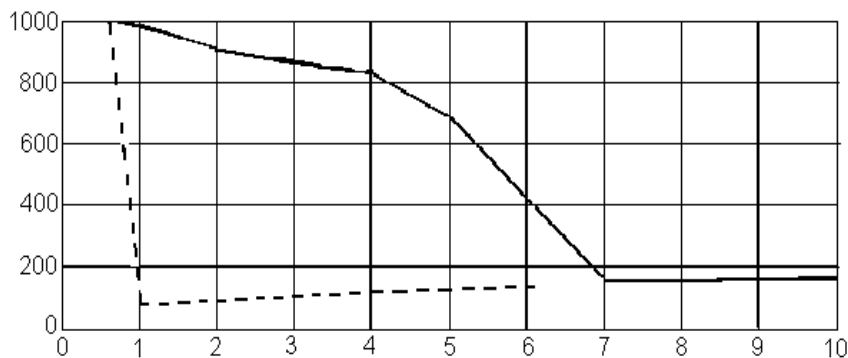


Рис. 1. Оценка числа источников коррелированных сигналов

**Оценка направлений прихода помеховых сигналов.** Формирование оценок НП ПС высоко-разрешающими методами спектрального анализа также, как и оценок числа источников излучения, осложняется фактором наличия корреляции между ПС и между ЗС и ПС.

Применение процедур декорреляции сигналов, принятых РИЗ, позволяет значительно расширить возможности алгоритмов типа MUSIC и других сверхразрешающих алгоритмов, по оценке НП частично коррелированных сигналов.

Порядок расчетов при реализации пеленгации источников смеси ЗС и ЭС собственно структурным методом MUSIC следующий.

1. Рассчитываются собственные числа  $\gamma_i$ ,  $i \in 0, L-1$  и собственные вектора  $\mathbf{e}_i$  КМ  $\tilde{\mathbf{H}}$  и располагаются в порядке убывания  $\gamma_0 \geq \gamma_1 \geq \dots \geq \gamma_{L-1}$ .

2. Используя оценку  $\hat{V}$ , полученную методом MDL, отбираются  $L-V$  меньшие собственные числа  $\gamma_{V+1}, \gamma_{V+2}, \dots, \gamma_{L-1}$  и соответствующие им собственные вектора  $\mathbf{e}_{V+1}, \mathbf{e}_{V+2}, \dots, \mathbf{e}_{L-1}$ .

3. Из полученного в пункте 2 набора собственных векторов  $\mathbf{e}$  формируется  $L \times (L-V)$  матрица пространства шума

$$\mathbf{E}_{\text{ш}} = [\mathbf{e}_{V+1}, \mathbf{e}_{V+2}, \dots, \mathbf{e}_{L-1}]. \quad (7)$$

4. Используя априорную информацию о геометрии РИЗ и характеристиках отдельных ее элементов, формируется вектор математического сканирования

$$\mathbf{a}(\psi) = [\dots, \exp(ji\psi), \dots]^T, \quad i \in 0, L-1, \quad (8)$$

где  $\psi = 2\pi d \lambda^{-1} \sin \theta$ ,  $-\pi \leq \psi \leq \pi$  при  $d = 0, 5\lambda$ .

5. Рассчитывается функция, отображающая пространственный спектр расположения ЗС и ПС согласно формул [6, 7]

$$\mathbf{M}\mathbf{u}(\psi) = (\mathbf{a}^H \mathbf{E}_{\text{ш}} \mathbf{E}_{\text{ш}}^H \mathbf{a})^{-1}. \quad (9)$$

В направлениях, где  $\mathbf{a}(\psi) = \mathbf{F}_u(\psi_u)$ , вектор  $\mathbf{a}(\psi) \perp \mathbf{E}_{\text{ш}}$  и выражение в скобках (9) обращается в ноль. Однако, из-за ошибок в оценке  $\tilde{\mathbf{H}}$  при конечном объеме выборки и неточном знании конструкции ФАР, т.е. несоответствия  $\mathbf{a}(\psi)$  реальному АФР в РИЗ, учитываемом в  $\tilde{\mathbf{H}}$  через функции  $\mathbf{F}_u(\psi_u)$ , это выражение имеет только резко выраженные минимумы в направлениях  $\psi = \psi_u$ .

Если число пеленгуемых источников  $V$  мало, то (9) можно представить в виде

$$\mathbf{M}\mathbf{u}(\psi) = (\mathbf{a}^H \mathbf{\Pi}_{\text{ш}} \mathbf{a})^{-1}, \quad (10)$$

$$\text{где } \mathbf{\Pi}_{\text{ш}} = \mathbf{I} - \mathbf{E}_{\text{с}} \mathbf{E}_{\text{с}}^H = \mathbf{E}_{\text{ш}} \mathbf{E}_{\text{ш}}^H; \quad (11)$$

$\mathbf{E}_{\text{с}}$  – подпространство сигналов, формируемых  $V$  первыми собственными числами и векторами КМ  $\tilde{\mathbf{H}}$ .

Для сравнения различных методов пеленгации в статье приведем результаты анализа спектра смеси ЗС и ПС при тех же исходных данных методами Кейпона и Бартлета.

Оценки пространственного спектра методом Кейпона могут быть получены по формуле [6, 8]

$$\mathbf{C}\mathbf{a}(\psi) = (\mathbf{a}^H \tilde{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{a})^{-1}, \quad (12)$$

а методом Бартлета

$$\mathbf{B}\mathbf{a}(\psi) = \mathbf{a}^H \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{a}. \quad (13)$$

В выражениях (10) – (13) вектора формируется согласно (8) с шагом, ориентировочно в 5 – 6 раз меньшим, чем ожидаемые разности  $\psi_u - \psi_v$ ,  $u, v \in 1, V$ .

На графиках рис. 2 представлены спектры  $\mathbf{M}\mathbf{u}(\psi)$ ,  $\mathbf{C}\mathbf{a}(\psi)$  и  $\mathbf{B}\mathbf{a}(\psi)$ , полученные при имитации разрешения  $V=7$  источников полностью коррелированных сигналов ( $\rho_{uv} = 1$ ) 16-ти элементной РИЗ. Количество подрешеток,  $K=6$ ; количество каналов в них  $L=11$ .

Реализация перечисленных выше спектральных функций (СФ) получена при несколько идеализированных условиях, то есть ошибки в реализации АФР в  $\mathbf{a}(\psi)$ , по сравнению с  $\mathbf{F}(\psi)$ , не превышают  $10^{-3}$  для фазового и относительного амплитудного распределений.

Результаты моделирования показывают, что, используя усредненную по пространству КМ  $\tilde{\mathbf{H}}$ , можно успешно пеленговать ориентировочно  $V \leq 2(2K)/3$  полностью коррелированных источников сигналов.

## Выводы

Предложенный метод и процедура усовершенствования собственно структурных алгоритмов углового спектрального анализа, позволяет сохранить их качества при пеленгации источников радиоизлучений, имеющих высокую степень корреляции между собой.

Имитационным моделированием подтверждена их работоспособность при оценке числа и НП полностью коррелированных между собой и зондирующих и помеховых сигналов.

Показано что при  $q \geq 20$  дБ, СКО АФР  $\sigma \leq 1 \cdot 10^{-2}$  и угловом разносе источников порядка половины ширины ДН РИЗ, вероятность правильного определения числа ПС близка к единице, а СКО в определении НП ПС не превышает 1,5% от ширины ДН РИЗ.

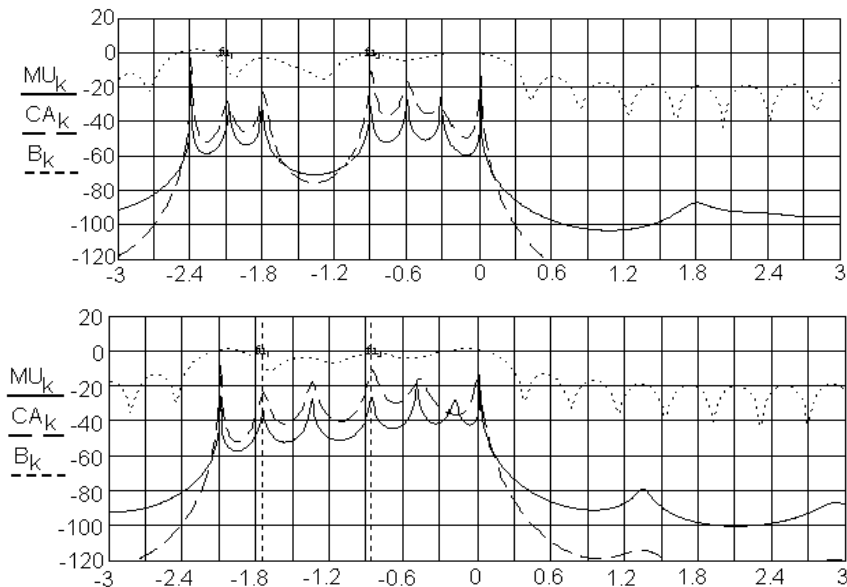


Рис. 2. Пространственные спектры, получаемые при помощи алгоритмов типа MUSIC (MU), а также методами Кейпона (CA) и Бартлетта (B)

### Список литературы

1. Воскресенский Д.И. Измерение внешних характеристик антенн с учетом искажающих факторов / Д.И. Воскресенский, Е.Н. Воронин, В.М. Комаров, Е.Е. Нецаев // Изв. ВУЗОВ, Радиоэлектроника. – 1984. – Т. 27, № 2. – С. 5-19.
2. Воронин Е.Н. Реконструктивные антенные измерения / Е.Н. Воронин, Е.Е. Нецаев, В.Ф. Шашенков. – М.: Наука, 1995. – 352 с.
3. Znao L. On deflection of the number of signals when the noise covariance matrix is arbitrary / Znao L., Krishnaiah P., Bai Z. // Journal of Multivariate Analysis. – 1986. – V. 20. – P. 26-49.
4. Williams D.B. Using the Sphericity Test for Source Deflection with Narrow – Band Passive Arrays / D.B. Williams, H. Johnson // IEE Trans. on ASSP. – 1990, November. – V. 38, №11. – P. 2008-2014.
5. Kashyap R.L. Inconsistency of the AIC rule for estimating the order of autoregressive models / R.L. Kashyap //

IEEE Trans. Automat. Contr. – 1980, Oct. – V. AC-25. – P. 996-998.

6. Krim H. Two decades of array signal processing research / H. Krim, M. Viberg // IEEE on Sign. Proc. Magazine. 1996, July. – P. 67-94.

7. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения / Д.Х. Джонсон // ТИИЭР. – 1982. – Т. 70, № 9. – С. 126-139.

8. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа / В.В. Дрогалин, В.И. Меркулов, В.А. Родзивилов [и др.] // Радиолокация и радиометрия. – 1999. – Вып. 1. – С. 52-68.

Поступила в редколлегию 10.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### МЕТОД ОЦЕНКИ ПОМЕХОВОЇ ОБСТАНОВКИ НА АНТЕННОМУ ПОЛІГОНІ

В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, Г.А. Головін, О.В. Бісова

Розглядається метод визначення числа і напрямку приходу помехових сигналів в умовах проведення експериментальних досліджень характеристик спрямованості антени в районі її дислокації. Проаналізований випадок, коли помехові сигнали утворюються в результаті віддзеркалення ехо-сигналів, що випромінюються досліджуваною антеною від земної поверхні, а ґрати вимірювальних зондів розташовані в дальній зоні. Обґрунтовано, що в даному випадку для визначення кількості дискретних джерел помехових сигналів, що виникають на трасі розповсюдження радіохвиль між досліджуваною антеною і ґратами вимірювальних зондів, достатньо однією вертикальною лінійкою еквідистантної ґрат приймальних зондів. Приведені результати моделювання конкретної помехової обстановки на антенному полігоні.

**Ключові слова:** антенні вимірювання, помехові сигнали, характеристики спрямованості антени, антенний полігон.

### METHOD OF DISTURBANCES SITUATION ESTIMATION ON AN AERIAL GROUND

V.D. Karlov, N.N. Petrushenko, G.A. Golovin, O.V. Besova

The method of determination of number and direction of arrival of disturbances signals is examined in the conditions of conducting of experimental researches of descriptions of orientation of aerial in the district of its distribution. A case is analysed, when disturbances signals appear as a result of reflection of echo-signals, radiated the probed aerial from an earthly surface, and the grate of measurings probes is located in a distant area. It is grounded, that in examined case for determining the amount of discrete sources of disturbances signals, arising up on the route of distribution of radio waves between the probed aerial and grate of measurings probes, sufficiently by one vertical line of equispaced grate of receiving probes. The results of design of concrete disturbances situation are resulted on an aerial ground.

**Keywords:** aerial measurings, disturbances signals, descriptions of orientation of aerial, aerial ground.