

# Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.396.96

В.И. Василишин, А.Д. Богданов

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Проведен анализ эффективности метода углового разрешения источников коррелированных сигналов в пространственно-многоканальных системах приема, основанного на использовании размножения выборки выходных сигналов антенной решетки посредством псевдослучайных перестановок выборки. Приведены результаты имитационного моделирования, подтверждающие возможности этого метода по угловому разрешению источников коррелированных сигналов в условиях малого объема выборки.*

**Ключевые слова:** коррелированные сигналы, псевдослучайные перестановки.

### Введение

Современные методы пространственно-временного спектрального анализа (ПВСА) характеризуются разрешающей способностью, которая может превышать рэлеевский предел [1]. Задача пеленгации источников излучения (ИИ) – одна из задач, для решения которых применяются такие методы. Реализация методов ПВСА зачастую предполагает выполнение некоторых условий [1 – 4]. Так, для ряда методов ПВСА (например, собственноструктурных (СС)) предполагается, что сигналы, приходящие от внешних ИИ, не коррелированы между собой [1, 3, 4].

Однако в реальных условиях работы радиотехнических систем излучения различных ИИ могут быть частично или полностью коррелированы [1]. Коррелированность сигналов ИИ негативно влияет на характеристики методов спектрального анализа. В связи с этим требуется снижать чувствительность методов ПВСА к коррелированности сигналов ИИ применяя методы их декорреляции [1 – 4].

Наиболее известный подход к декорреляции излучений – метод пространственного сглаживания (ПС) корреляционной матрицы (КМ) наблюдения. Однако данный метод характеризуется определенными ограничениями: предполагается эквидистантное расположение и идентичность элементов антенной решетки (АР) и т.д. [1 – 4].

В связи с этим представляет интерес работа [4], свободная от указанных ограничений, в которой для выполнения ПС КМ применена псевдослучайная обработка выходных сигналов АР. В этой работе и ряде других (в том числе более ранних) работ [5 – 9] использованы подходы к увеличению эффективного объема выборки за счет генерации повторных выбо-

рок (псевдовыборок) из исходного массива. Перестановка элементов выборки может быть рассмотрена как один из алгоритмов технологии получения суррогатных данных [7 – 9]. В работах [5, 6] эта технология применена для повышения эффективности ПВСА СС методами, а в работах [7 – 9] – временного спектрального анализа этими методами в условиях временной коррелированности выборок (подвыборок). Спектральный анализ в [7 – 9] осуществлялся в условиях малой выборки. В связи с этим представляет интерес анализ эффективности метода [4] для таких условий. **Цель работы** – анализ эффективности метода углового разрешения источников коррелированных сигналов [4], основанного на использовании псевдослучайных перестановок выходных сигналов АР, в условиях малой выборки.

### Модель данных

Рассмотрим линейную эквидистантную АР (ЛЭАР) из  $M$  элементов. Расстояние между соседними элементами равно  $d$ , а их координаты  $\ell_i = (i-1) \times d$ ,  $i = 1, \dots, M$ . На ЛЭАР поступают электромагнитные волны от  $V$  ИИ, расположенных в ее дальней зоне, под углами  $\theta_1, \dots, \theta_V$  относительно нормали к линии ЛЭАР. Задержка фронта волны  $v$ -го источника,  $v = 1, \dots, V$ , в точке  $\ell_i$  относительно точки  $\ell_1$  равна  $\tau_{3,i} = (i-1)\Delta_v$ , где  $\Delta_v = d \sin \theta_v / c$ ,  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Вектор наблюдений можно представить как [2]

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_V)]$  –  $M \times V$  матрица векторов амплитудно-фазового распределения (АФР) сигналов ИИ на элементах АР,  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_V]^T$  –  $V \times 1$

вектор направлений прихода (НП) сигналов. Столбцами этой матрицы являются векторы

$$\mathbf{a}(\theta) = [\exp(j\omega l_1 \sin \theta / c), \dots, \exp(j\omega l_M \sin \theta / c)]^T, \quad (2)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота,  $f$  – центральная частота спектра сигнала ИИ. Кроме того,  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \dots s_V(t)]^T$  –  $V \times 1$  вектор сигналов,  $(\cdot)^T$  означает операцию транспонирования,  $\mathbf{n}(t)$  –  $M \times 1$  вектор комплексной огибающей собственного шума АР. Сигналы ИИ имеют квазигармонический по пространству характер и шумовой или гармонический по времени [1, 2].

При отсутствии взаимной корреляции сигналов ИИ  $V \times V$  КМ сигналов  $\mathbf{S}$  диагональна. В случае, если сигналы ИИ коррелированы

$$S_{pq} = \sigma_p \sigma_q \rho_{pq}, \quad p, q = 1, \dots, V, \quad (3)$$

где  $\sigma_p^2$  – мощность сигнала  $p$ -го источника в одном элементе АР,  $\rho_{pq} = |\rho_{pq}| \exp(j\phi_{pq})$  – комплексный коэффициент корреляции сигналов  $p$ -го и  $q$ -го источников,  $\phi_{pq}$  – разность фаз коррелированных компонент сигналов  $p$ -го и  $q$ -го источников [1 – 4]. Когерентность сигналов нескольких источников приводит к уменьшению ранга матрицы  $\mathbf{S}$  уменьшает. ПС КМ восстанавливает ранг  $\mathbf{S}$ , однако при этом уменьшается эффективная апертура АР [1].

Перейдем к рассмотрению особенностей и анализу эффективности подхода к декорреляции сигналов ИИ [4], в котором не требуется разбивать АР на подрешетки. Возможность отказа от сегментации наблюдения также отмечена в [9].

### Анализ эффективности метода углового разрешения коррелированных сигналов

Предложенный в [4] метод использует принцип согласования АР с сигналом, поступающим с направления  $\theta$ . Вектор входных данных сфазированной в направлении  $\theta$  АР имеет вид [1,4]

$$\mathbf{x}(t, \theta) = \mathbf{P}(\theta) \mathbf{A}(\theta) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4)$$

где  $\mathbf{P}(\theta) = \text{diag} \left\{ e^{-j\omega l_1 \sin \theta / c}, \dots, e^{-j\omega l_M \sin \theta / c} \right\}$  –

$M \times M$  диагональная матрица. Угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к апертуре АР.

В результате случайных перестановок элементов  $\mathbf{x}(t, \theta)$  получают псевдовыборки  $\mathbf{y}(t, \theta) = F_{\text{пп}}(\mathbf{x}(t, \theta))$ , где  $F_{\text{пп}}$  – оператор псевдослучайной перестановки. Так как

$$\mathbf{P}(\theta) \mathbf{a}(\theta_i) = \begin{bmatrix} e^{j\frac{\omega}{c} l_1 (\sin \theta_i - \sin \theta)} & \dots & e^{j\frac{\omega}{c} l_M (\sin \theta_i - \sin \theta)} \end{bmatrix}^T,$$

то при  $\theta = \theta_i$   $\mathbf{P}(\theta_i) \mathbf{a}(\theta_i) = \mathbf{1}$ , где  $\mathbf{1} = [1 \dots 1]^T$  –  $M \times 1$  вектор из единиц.

Для сигналов с НП прихода  $\theta_i \neq \theta_2$  запаздывания в разных элементах АР отличаются. После применения  $F_{\text{пп}}$  действие сигналов с такими НП можно интерпретировать как действие случайного процесса со спектром, близким к спектру белого шума.

В [4] для определения угловых координат ИИ применена модификация метода Кейпона, спектральная функция (СФ) которой имеет вид

$$P(\theta) = (\mathbf{1}^T \cdot \hat{\mathbf{R}}_{\text{пп}}^{-1}(\theta) \cdot \mathbf{1})^{-1}, \quad (5)$$

где оценка КМ  $\hat{\mathbf{R}}_{\text{пп}}(\theta)$  получена по  $N_{\text{пв}}$  сформированным псевдовыборкам.

Анализ эффективности рассмотренного метода выполнялся посредством имитационного моделирования. Использовалась ЛЭАР из  $M = 10$  элементов с  $d = \lambda / 2$ . Предел разрешения по Рэлею для такой решетки  $\Delta_R = 2 / (M - 1) \text{ rad} \approx 12.8^\circ$ . В ходе моделирования рассматривались ситуации, в которых число равномошных источников равно двум и пяти. Число выборок  $N = 1$ . Шаг фазирования  $\Delta\theta = 1^\circ$ , число псевдовыборок  $N_{\text{пв}} = 100$ . В первом случае рассматривалось угловое разрешение двух когерентных сигналов ( $|\rho_{12}| = 1$ ,  $\phi_{12} = 0$ ) с НП  $\theta_1 = -4^\circ$ ,  $\theta_2 = 4.5^\circ$ . Мощность сигналов ИИ равнялась 20 дБ (по отношению к мощности шума в одном элементе ЛЭАР).

СФ метода углового разрешения [4] для этих условий приведена на рис. 1. Из анализа рис. 1 видно, что сигнальные максимумы СФ смещены относительно истинных значений НП. Разница между максимумами СФ и провалом между ними составляет 3 дБ. Так как угловое расстояние между источниками меньше  $\Delta_R$ , то можно говорить о их сверхразрешении.

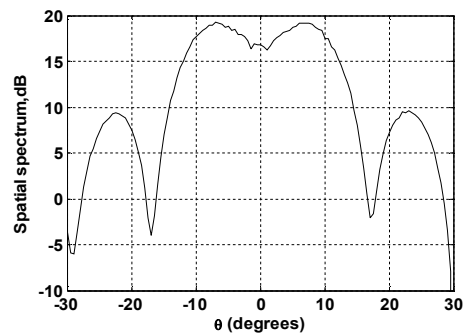


Рис. 1. Реализация СФ (7) для 2 когерентных сигналов с  $\theta_1 = -4^\circ$ ,  $\theta_2 = 4.5^\circ$

Число ИИ можно определять по числу наиболее значимых максимумов СФ. Следует отметить, что при  $\Delta\theta < 1^\circ$  проявляются флуктуации СФ, которые не характерны для СФ исходного метода Кейпона. Их уменьшение достигается увеличением числа псевдовыборок.

Во втором случае число когерентных сигналов равнялось пяти, а их НП  $\theta_1 = -30^\circ$ ,  $\theta_2 = -15^\circ$ ,  $\theta_3 = 0^\circ$ ,  $\theta_4 = 15^\circ$ ,  $\theta_5 = 30^\circ$  [4]. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

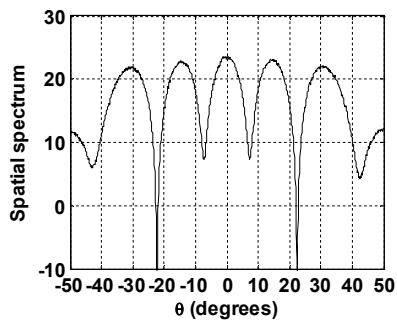


Рис. 2. Реализация СФ (7) для 5 когерентных сигналов,  $N_{\text{пв}} = 100$

Из анализа рис. 2 видно, что смещение оценок в этом случае близко к нулю.

Результаты моделирования также показывают, что угловое разрешение источников с таким угловым разносом возможно и при более низких мощностях сигналов ИИ. Однако по мере уменьшения отношения сигнала к шуму начинает проявляться смещение оценок. Работоспособность рассмотренного подхода сохраняется и при разной мощности сигналов источников.

## Выводы

В работе проведен анализ эффективности метода углового разрешения угловых координат источников коррелированных сигналов, основанного на использовании размножения выборки путем ее псевдослучайных перестановок. В ситуации с двумя равномоными источниками их сверхразрешение возможно, но при угловом расстоянии между ними близком к рэлеевскому пределу. По мере роста числа источников становится возможным лишь угловое разрешение.

Уменьшение флуктуаций СФ метода [4] достигается увеличением числа псевдовыборок. К направлениям дальнейших исследований следует отнести сравнительный анализ рассмотренного метода с подходами [7, 8].

## Список литературы

1. Караваев В.В. Статистическая теория пассивной радиолокации / В.В. Караваев, В.В. Сазонов. – М.: Радио и связь, 1997. – 240 с.
2. Gershman A.B. Optimal subarray size for spatial smoothing / A.B. Gershman, V.T. Ermolaev // IEEE Signal Processing Letters. – 1995. – Vol. 2, No. 2. – P. 28-30.
3. Василюшин В.И. Эффективность модифицированного метода пространственного сглаживания / В.И. Василюшин, М.В. Грушенко, А.Н. Колесников // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – X. : ХУПС, 2005. – Вип. 1(1). – С. 89-93.
4. Серебряков И.Г. Угловое разрешение источников коррелированных сигналов с использованием псевдослучайной обработки / И.Г. Серебряков, Г.В. Серебряков // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 8. – С. 1-11.
5. Vasylyshyn V.I. Improving the performance of Root-MUSIC via pseudo-noise resampling and conventional beamformer / V.I. Vasylyshyn // Third Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium: conf., 2011. – Kyiv (Ukraine), 2011. – P.246-249.
6. Vasylyshyn V. Removing the outliers in root-MUSIC via pseudo-noise resampling and conventional beamformer / V. Vasylyshyn // Signal processing. – 2013. – Vol. 93. – P. 3423-3429.
7. Василюшин В.И. Адаптивная коррекция предварительной обработки сигналов с использованием технологии суррогатных данных в задачах спектрального анализа / В.И. Василюшин // Системи обробки інформації. – X.: ХУПС, 2013. – Вип. 2 (109). – С. 15-20.
8. Костенко П.Ю. Повышение эффективности спектрального анализа сигналов методом Root-MUSIC с использованием суррогатных данных / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин // Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 31-39. – (Изв. Вузов).
9. Костенко П.Ю. Повышение эффективности спектрального анализа при низких отношениях сигнал/шум с использованием технологии суррогатных данных без сегментации наблюдений / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин // Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 36-47. – (Изв. Вузов).

Поступила в редколлегию 3.01.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. М.А. Павленко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДА КУТОВОГО РОЗДІЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ КОРЕЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ З ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПРОСТОРОВОЮ ОБРОБКОЮ

В.І. Василюшин, О.Д. Богданов

Проведений аналіз ефективності метода кутового розділення джерел корельованих сигналів в просторово-багатоканальних системах приймання, оснований на використанні розмноження вибірки вихідних сигналів антенної решітки шляхом псевдовипадкових перестановок вибірки. Приведені результати імітаційного моделювання, що підтверджують можливість цього методу по кутовому розділенню джерел корельованих сигналів в умовах малого об'єму вибірки.

**Ключові слова:** корельовані сигнали, псевдовипадкові перестановки.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF THE METHOD OF ANGULAR RESOLUTION OF THE CORRELATED SIGNAL SOURCES WITH PSEUDORANDOM SPATIAL PROCESSING

V.I. Vasylyshyn, O.D. Bogdanov

The performance analysis of the method of angular resolution of correlated signal sources in the spatially multi-channel receiving system which is based on the resampling of sample of antenna array output signal by pseudorandom permutation of the sample is performed. The simulation results which confirm the possibilities of the method for angular resolution of correlated signal sources in the small sample condition are presented.

**Keywords:** correlated signals, pseudorandom permutations.