

УДК 621.396.96

В.И. Василишин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

КОМБИНИРОВАННАЯ ПЕЛЕНГАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАНДОМИЗАЦИИ СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ЛУЧА

В статье предложен вариант стратегии комбинированной пеленгации источников шумового излучения (ИШИ), основанный на методе Root-MUSIC с рандомизацией собственных векторов (СВ) корреляционной матрицы наблюдения. Для уменьшения числа аномальных оценок (выбросов) в оценках угловых координат ИШИ метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ используется метод формирования луча. Представлены результаты имитационного моделирования, подтверждающие повышение точности пеленгации ИШИ в области порогового отношения сигнал-шум и обучающей выборки ограниченного объема.

Ключевые слова: комбинированная пеленгация, собственные значения, собственные векторы, сингулярные значения, сингулярные векторы, просачивание подпространств, рандомизация.

Введение

Пеленгация (оценивание угловых координат) точечных ИШИ в многоканальных по пространству системах приема – важная радиолокационная задача, в которой целесообразно применение современных методов спектрального (пространственного) анализа со "сверхразрешением" [1 – 3]. К таким методам относятся методы, основанные на использовании информации, которая содержится в собственных значениях (СЗ) и собственных (характеристических) векторах корреляционной матрицы (КМ) наблюдения [1]. Задача поиска СЗ и СВ априори неизвестной КМ также является составной частью дискретного преобразования Карунена–Лоэва, метода главных компонент, факторного анализа и т.д. [1, 4 – 6]. Кроме того, частичная (или полная) проблема СЗ решается при вычислении дискретных вытянутых сфероидальных последовательностей (ДВСП), применяемых при синтезе антенн, формировании многолучевых диаграмм направленности, спектральном анализе и т.д. [1, 3, 7 – 9].

Вместо проблемы СЗ может решаться проблема сингулярных значений (поиска сингулярных значений (СИЗ) и сингулярных векторов матрицы (СИБ) данных – singular value decomposition (SVD)). Метод SVD также применяется при обработке изображений, понижении уровня шума в наблюдении [1, 4, 6, 10].

К методам спектрального анализа, основанным на использовании СЗ и СВ КМ наблюдения (называемых собственноструктурными (eigenstructure) или основанными на подпространствах СВ (subspace-based)), относятся методы Писаренко, MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT, Min-Norm и другие [1, 3, 10].

Данные методы в условиях, предполагаемых для их реализации – отсутствия взаимного влияния антенных элементов, отсутствия пространственной окраски шума наблюдения, высоких отношений сигнал-шум и т.д. позволяют повысить точность оценивания угловых координат ИШИ по сравнению с "несобственноструктурными" методами (минимальной дисперсии Кейпона, линейного предсказания, "теплого шума") [1, 2].

Однако в условиях низкого отношения сигнал-шум (ОСШ), малого числа выборок (снимков), коррелированности сигналов ИШИ эффективность СС методов ухудшается – среднеквадратическая ошибка (СКО) оценивания угловых координат ИШИ резко увеличивается (имеет место пороговый эффект) [1, 7 – 18]. Среди оценок угловых координат увеличивается число аномальных оценок (выбросов-outliers) [1, 7 – 20].

В таких условиях снижение эффективности характерно и для методов обработки сигналов, изображений, использующих анализ главных компонент, факторный анализ [1, 4 – 6].

Пороговый эффект СС методов связывают с возникновением подкачки (обмена) подпространств (subspace swap) [1, 10, 11], когда некоторые из СВ подпространства шума (ППШ) выборочной КМ лучше представляют подпространство сигналов (ППС) истинной КМ, чем некоторые СВ ППС. В работе [11] показано, что понижение эффективности СС методов в большей мере связано с перетеканием подпространств (subspace leakage), а не полным обменом подпространств. Следует отметить, что эффект просачивания характерен и для методов спектрального анализа, основанных на дискретном преобразовании Фурье [1].

Среди подходов, позволяющих улучшить пороговую эффективность СС методов, отметим следующие. В [12] предложено комбинирование метода Root-MUSIC с методом формирования луча (полученный метод будем называть модифицированным методом Root-MUSIC). В [13] получен модифицированный унитарный метод Root-MUSIC, в котором выполняется предварительное невырожденное линейное преобразование КМ сигналов центрально-симметричной антенной решетки (АР).

Перспективным является предложение комбинированной пеленгации ИШИ (стратегии совместного оценивания (ССО)) [14], заключающееся в вычислении нескольких методов оценивания угловых координат ИШИ (банка методов) по одним и тем же выборкам. Результатом является совокупность предварительных оценок НП сигналов ИШИ. В соответствии с некоторым правилом на основании этих оценок получают результирующие (окончательные) оценки НП сигналов. Эффективность комбинированной пеленгации (КП) в условиях, при которых возникает пороговый эффект, выше, чем пеленгаторов, входящих в состав банка методов.

В [15] приведен вариант ССО, в котором использовались модифицированный метод Root-MUSIC и модифицированные обобщенные методы Min-Norm. Ограничением этого варианта ССО является то, что число методов ограничено числом антенных элементов. Реализация ССО, основанная на адаптивных решетчатых фильтрах, и использующая несобственноструктурные методы спектрального анализа рассмотрена в [2].

Доступное число методов банка увеличено в псевдослучайной (ПС) ССО [14]. В этой версии ССО использовались методы MUSIC с "взвешиванием". При этом выполнялось размножение СВ выборочной КМ за счет их многократной рандомизации [19] с помощью псевдослучайной взвешивающей матрицы. Модификация ПС ССО для случая предварительного формирования пространственных каналов (пространства лучей) предложена в [7].

В [16] показана возможность построения банка с использованием одного СС метода (на примере MUSIC), который вычисляется для некоторого числа псевдовыборок наблюдений (равного размерности банка). Псевдовыборки формируются подмешиванием псевдослучайного шума к исходным данным и позволяют уменьшить влияние эффекта перетекания подпространств. Однако при этом может требоваться выполнение цензурирования получаемых оценок. В работе [17] эта идея обобщена с использованием модифицированного метода Root-MUSIC и показано, что комбинирование метода Root-MUSIC и метода формирования луча (ФЛ) Бартлетта при использовании псевдовыборок позволяет улучшить процесс отбора сигнальных корней метода Root-

MUSIC и уменьшить число аномальных оценок (снизить вероятность аномальных ошибок оценивания). Поэтому представляет интерес обобщить результаты работ [15, 17] на случай размножения СВ посредством их многократной рандомизации.

Цель данной работы – повышение точности пеленгации ИШИ в условиях низкого ОСШ при использовании стратегии комбинированной пеленгации точечных ИШИ за счет комбинирования метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ и метода ФЛ.

Модель данных

Пусть на линейную эквидистантную АР (ЛЭАР) из M элементов поступают сигналы от V ИШИ, находящихся в дальней зоне АР. Сигналы ИШИ и шум наблюдения предполагаются стационарными, некоррелированными случайными процессами с нулевым средним. Шум наблюдения также предполагается пространственно и по времени белым. $M \times 1$ вектор наблюдений может быть представлен в виде [1–3]:

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

где $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_V)]$ – $M \times V$ матрица векторов НП сигналов ИШИ, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_V]^T$ – $V \times 1$ вектор направлений прихода (НП) сигналов ИШИ.

Кроме того,

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp(j\omega), \dots, \exp(j(M-1)\omega)]^T \quad (2)$$

$M \times 1$ вектор фазирования, соответствующий направлению θ , $\mathbf{s}(t)$ – $V \times 1$ вектор сигналов, $\mathbf{n}(t)$ – $M \times 1$ вектор аддитивного шума, $\omega = 2\pi d \sin \theta / \lambda$ – фазовый сдвиг (определяет направление прихода сигнала ИШИ) между элементами АР, d – межэлементное расстояние, λ – длина волны, $(\cdot)^T$ означает операцию транспонирования.

$M \times M$ КМ наблюдений определяется как

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{S}\mathbf{A}^H(\boldsymbol{\theta}) + \sigma^2\mathbf{I}, \quad (3)$$

где $\mathbf{S} = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$ – $V \times V$ КМ сигналов, σ^2 – дисперсия шума, \mathbf{I} – единичная матрица, $E[\cdot]$ и $(\cdot)^H$ означают оператор математического ожидания и эрмитового транспонирования, соответственно.

Спектральное разложение КМ \mathbf{R} (разложение по СВ и СЗ) имеет вид [1]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}_s \boldsymbol{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \sigma^2 \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H, \quad (4)$$

где $M \times V$ матрица \mathbf{E}_s содержит СВ, связанные с сигнальными (наибольшими) СЗ, диагональная матрица $\boldsymbol{\Lambda}_s$ содержит V наибольших СЗ. $M \times (M - V)$ матрица \mathbf{E}_n содержит СВ ППШ.

Перейдем к рассмотрению модифицированного метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ (метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ и использованием ФЛ), примененного для построения банка методов.

Root-music с рандомизацией СВ и использованием метода ФЛ

Оценки НП сигналов ИШИ методом Root-MUSIC получают путем поиска корней полинома [1]

$$P_{\text{rm}}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1}) \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H \mathbf{a}(z), \quad (5)$$

где $\mathbf{a}(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T$, $z = \exp(j\omega)$, $j = \sqrt{-1}$, а $\hat{\mathbf{E}}_n$ - матрица СВ ППШ выборочной КМ

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) = \frac{1}{N} \mathbf{X} \mathbf{X}^H, \quad (6)$$

$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(t_1), \dots, \mathbf{x}(t_N)]$ - $M \times N$ матрица данных, N снимков данных. $P_{\text{rm}}(z)$ - полином степени $2(M-1)$, корни которого встречаются в зеркальных парах по отношению к окружности единичного радиуса на z -плоскости. Оценки НП получают по фазам V корней с наибольшим модулем ($z_v, v = 1, \dots, V$), находящихся внутри единичной окружности

$$\hat{\theta}_v = \arcsin((\lambda / 2\pi d) \arg(z_v)). \quad (7)$$

Полином i -го ($i = 1, \dots, G$) Root-MUSIC с рандомизацией СВ может быть представлен в виде

$$P_{W\text{-RM},i}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1}) \hat{\mathbf{E}}_n \mathbf{W}_i \hat{\mathbf{E}}_n^H \mathbf{a}(z). \quad (8)$$

Случай $\mathbf{W}_i = \mathbf{I}$ соответствует обычному Root-MUSIC, а $\mathbf{W}_i = \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^H$ [14], где $\mathbf{w}_i \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, $i = M+1, \dots, K+1$ соответствует Root-MUSIC с рандомизацией СВ. Здесь $\mathbf{W}_i = \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^H$ - матрица единичного ранга, а взвешивающий вектор \mathbf{w}_i получают с помощью генератора случайных чисел с комплексным гауссовским законом распределения.

В модифицированном методе Root-MUSIC [12, 13, 21] идентификация сигнальных корней основана на величине спектральной функции (СФ) ФЛ в направлениях "кандидатов" (M НП, связанных с M корнями полинома метода Root-MUSIC, лежащими внутри единичной окружности). СФ формирователя луча имеет вид

$$P_{\text{BF}}(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}} \mathbf{a}(\theta). \quad (9)$$

Обобщение этой идеи для метода Root-Min-Norm выполнено в [15], для Root-MUSIC с использованием псевдовыборки - в [17], и может быть осуществлено для метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ. Следует отметить, что СФ $P_{\text{BF}}(\theta)$ также использовалась для уменьшения числа аномальных ошибок, связанных с неправильным раскрытием неоднозначности в [20]. Вместо ФЛ Бартлетта может быть использована его модификация с амплитудно-фазовым распределением Дольфа-Чебышева [12, 21], а также ФЛ, использующий ДВСИ (сигнальные СВ КМ, построенной по векторам $\mathbf{a}(\theta)$ при измене-

нии θ в пределах сектора (кластера), определяемого, например, с помощью ФЛ Бартлетта).

Модифицированный метод Root-MUSIC с рандомизацией СВ включает следующие шаги:

Шаг 1. Вычислить корни полинома метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ (8). Отобрать из них $M-1$ корней, находящихся внутри единичной окружности на комплексной плоскости, и вычислить углы $\theta_{\text{cand},1}, \dots, \theta_{\text{cand},M-1}$, связанные с этими корнями - $\hat{\theta}_{\text{cand},m} = \arcsin((\lambda / 2\pi d) \arg(z_m))$, $m = 1, \dots, M-1$.

Шаг 2. Получить последовательность значений СФ $P_{\text{BF}}(\theta_{\text{cand},m})$ для углов $\theta_{\text{cand},m}$, $m = 1, \dots, M-1$. Отобрать из $\theta_{\text{cand},1}, \dots, \theta_{\text{cand},M-1}$ V элементов ($\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_V$), при которых СФ $P_{\text{BF}}(\theta_{\text{cand},m})$ имеет максимальные значения.

Рассмотрим особенности предлагаемого варианта стратегии комбинированной пеленгации.

Комбинированная пеленгация ИШИ

Идея КП состоит в вычислении совокупности разных методов пеленгации ($i = 1, \dots, G$) с целью получить множество оценок НП $\hat{\theta}^{(i)} = [\hat{\theta}_1^{(i)}, \dots, \hat{\theta}_V^{(i)}]^T$, $i = 1, \dots, G$ (предполагается, что хотя бы один метод разрешает источники). Затем отбирают $\hat{\theta}^{(i)}$, которые не содержат выбросы. Для удаления $\hat{\theta}^{(i)}$ с выбросами и группировки методов с $\hat{\theta}^{(i)}$ без аномальных оценок может быть использована следующая гипотеза:

H: \hat{V} оценок угловых координат ИШИ метода пеленгации находятся в секторах локализации источников сигналов $\hat{\theta}_c$.

Предлагаемый вариант стратегии КП включает следующие шаги:

Шаг 1. Оценить число источников \hat{V} [22].

Шаг 2. Определить сектора (кластеры) локализации ИШИ (например, с помощью (9) [15])

$\hat{\theta}_c = [\theta_{1L}, \theta_{1R}] \cup [\theta_{2L}, \theta_{2R}] \cup \dots \cup [\theta_{FL}, \theta_{FR}]$, (10)
где $\theta_{iL}, \theta_{iR}, i = 1, \dots, F$ - левая и правая границы i -го сектора.

Шаг 3. Вычислить метод Root-MUSIC и проверить гипотезу H (попадание оценок угловых координат ИШИ в сектор $\hat{\theta}_c$). Если она выполняется, то оценки НП сигналов ИШИ этого метода - окончательные оценки НП. Прервать алгоритм и перейти к шагу 6. Иначе перейти к шагу 4.

Шаг 4. Вычислить G модифицированных методов Root-MUSIC с рандомизацией СВ и проверить гипотезу H для каждого из них. Если H выполня-

ется для любых L ($0 < L \leq G$) из G методов, то оценить v -ое НП как

$$\hat{\theta}_v = \text{med} \left\{ \tilde{\theta}_v^{(1)}, \tilde{\theta}_v^{(2)}, \dots, \tilde{\theta}_v^{(L)} \right\}, v = 1, \dots, \hat{V}, \quad (12)$$

где $\tilde{\theta}_1^{(1)} < \tilde{\theta}_2^{(1)} < \dots < \tilde{\theta}_V^{(1)}$ – упорядоченное множество

предварительных оценок, полученных на шаге 2 1-го ($1 = 1, \dots, L$) модифицированного Root-MUSIC с рандомизацией СВ), med соответствует медианному усреднению [1, 15].

Шаг 5. Если N не принята для всех G модифицированных методов Root-MUSIC с рандомизацией СВ, то оценить НП v -го источника как медиану G оценок, соответствующих источнику.

Шаг 6. Стоп.

Отметим, что вместо медианного усреднения может выполняться обычное усреднение оценок НП. Кроме того, эффективность стратегии КП зависит от числа методов в банке – чем больше методов, тем выше эффективность (повышается вероятность того, что по крайней мере один из методов банка разрешает источники).

В ходе моделирования предполагалось, что для пеленгации двух равномошных некоррелированных источника с угловыми координатами $\theta_1 = 12^\circ$,

$\theta_2 = 15^\circ$ используется ЛЭАР из $M = 10$ элементов. Рассматривался случай, когда источники находятся в одном секторе (кластере) [1, 8, 14]. В ходе моделирования сектор определялся как $\hat{\theta}_c = [\theta_1 - \Delta_R / 2, \theta_2 + \Delta_R / 2] = [5.58, 21.42]$, где $\Delta_R = 2 / (M - 1) \text{ рад} \approx 6.4^\circ$ – ширина ДН антенны.

Число выборок данных $N = 70$. Каждая точка зависимостей СКО оценивания угловых координат ИШИ рассматриваемых методов и подходов пеленгации от ОСШ получена путем проведения $G = 1000$ прогонов моделирования. Выборочные СКО усреднены по источникам [3, 14]. Размерность банка методов $G = 12$. На рис. 1 показаны зависимости СКО оценивания угловых координат ИШИ от ОСШ метода Root-MUSIC (кривая 1), варианта стратегии КП, построенного на базе метода Root-MUSIC с рандомизацией СВ без использования метода ФЛ [14] (кривая 2), предложенного варианта стратегии КП (кривая 3). Также приведена нижняя граница Крамера-Рао [1] (кривая 4). ОСШ определялось как $\text{SNR} = 10 \log_{10}(\sigma_s^2 / \sigma^2)$, где σ_s^2 и σ^2 – дисперсия сигнала и шума, соответственно.

Из анализа рис. 1 видно, что предложенный вариант стратегии КП имеет лучшую пороговую эффективность, чем стратегия КП, в которой не используется дополнительное отсеивание выбросов с помощью метода ФЛ, и метод Root-MUSIC.

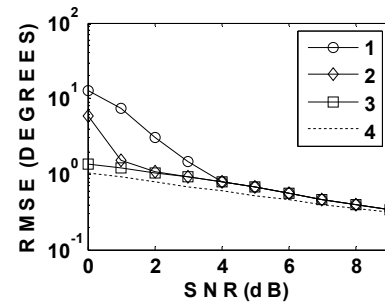


Рис. 1. СКО оценивания угловых координат ИШИ в зависимости от ОСШ

Следует отметить, что оценивание сектора расположения источников с использованием (9) будет влиять на точность пеленгации предложенным подходом.

Кроме того, в условиях ограниченного (в особенности малого [1]) объема обучающей выборки и низкого ОСШ оказывает влияние точность оценивания числа источников и величина боковых лепестков СФ метода ФЛ.

Выводы

В работе предложен модифицированный метод Root-MUSIC с рандомизацией СВ, в котором отбор сигнальных корней осуществляется по величине СФ метода ФЛ.

Этот метод использован для предложенного варианта стратегии КП ИШИ.

Уменьшение вычислительной сложности рассмотренного подхода может быть достигнуто распараллеливанием вычислений с помощью систолических массивов процессорных элементов [23], графических процессорных элементов.

К направлениям дальнейших исследований можно отнести использование результатов работ [2, 13], расширение набора методов, используемых для КП, а также использование подхода по идентификации аномальных оценок НП сигналов и их "лечению" [8].

Кроме того, представляет интерес обобщение предложенного подхода на случай пространственно-окрашенного шума, предварительного формирования пространственных каналов.

Список литературы

1. *Trees H.L.V. Optimum array processing. Part IV of Detection, Estimation and modulation theory / H.L.V. Trees. – Wiley-interscience, 2002.*
2. *Леховицкий Д.И. Сравнение разрешающей способности комбинированных пеленгаторов различного типа в приемных системах с неидентичными каналами / Д.И. Леховицкий, Д.В. Атаманский, В.В. Джус, Ф.Ф. Мысик // Антенны. – 2003. – Вып. 12(79). – С. 9-15.*
3. *Vasylyshyn V.I. DOA estimation via unitary TLS – ESPRIT algorithm with structure weighting / V.I. Vasylyshyn // 27th URSI GA: int.conf., Netherlands. – 2002. CD, report 0086.*

4. Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis* / I.T. Jolliffe. – Springer, 2002. – 487 p.
5. Гурко В.Л. Спектральная теория случайных матриц / В.Л. Гурко. – М.: Наука, 1988. – 376 с.
6. Хуанг Т. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг. – М.: Мир, 1979. – 315 с.
7. Gershman A.B. *Direction finding using beamspace root estimator banks* / A.B. Gershman // *IEEE Trans. SP.* – 1998. – Vol. 46. – P. 3131-3135.
8. Vasylyshyn V.I. *Beamspace root estimator bank for DOA estimation with an improved threshold performance* / V.I. Vasylyshyn // *ICATT: int.conf.*, 2013, Odessa, Ukraine: *proc. of conf.* – 2013. – P. 280-282.
9. Василюшин В.И. Оценивание числа гармонических компонент сигнала с использованием технологии суррогатных данных / В.И. Василюшин // *Прикладная радиоэлектроника.* – 2013. – Т.12, № 4. – С. 412-418.
10. Василюшин В.И. Предварительная обработка сигналов с использованием метода SSA в задачах спектрального анализа / В.И. Василюшин // *Прикладная радиоэлектроника.* – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 42-49.
11. Johnson B.A. *The role of subspace swap in MUSIC performance breakdown* / B.A. Johnson, Y. Abramovich, X. Mestre // *ICASSP: int.conf.*, 2008, Las Vegas, NV: *proc. of conf.* – 2008. – P. 2473-2476.
12. Gershman A.B. *Removing the outliers in Root-MUSIC via conventional beamformer* / A.B. Gershman, J. Ringelstein, J.F. Böhme // *Signal Processing.* – 1997. – Vol.60. – P. 251-254.
13. Василюшин В.И. Модифікований унітарний алгоритм Root-MUSIC / В.И. Василюшин // *Зб. наук. праць XI ВПС.* – Х.: XI ВПС, 2003. – Вип. №9. – С. 63-70.
14. Gershman A.B. *Pseudo-randomly generated estimator banks: A new tool for improving the threshold performance of direction finding* / A.B. Gershman // *IEEE Trans. Signal Processing.* – 1998. – Vol. 46. – P. 1351-1364.
15. Vasylyshyn V.I. *Direction finding with superresolution using root implementation of eigenstructure techniques and joint estimation strategy* / V.I. Vasylyshyn // *European Conference on Wireless Technology: conf.*, 2004, Amsterdam, Netherlands: *proc. of conf.* – 2004. – P. 317-320.
16. Gershman A.B. *A pseudo-noise approach to direction finding* / A.B. Gershman, J.F. Böhme // *Signal Processing.* – 1998. – Vol. 71. – P. 1-13.
17. 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.
18. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
19. Маркова Е.В. Рандомизация и статистический вывод / Е.В. Маркова, А.А. Маслак. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 208 с.
20. Vasylyshyn V.I. *Direction of arrival estimation using ESPRIT with sparse arrays* / V.I. Vasylyshyn // *Proc. of European Radar Conference.* – Rome (Italy), 2009. – P. 246-249.
21. Василюшин В.И. Анализ влияния типа алгоритма “формирования диаграммы направленности” на точностные показатели модифицированного алгоритма Root-MUSIC / В.И. Василюшин, А.Н. Колесников, А.Н. Самсонкин // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи.* – Х.: НАКУ “ХАІ”, 2003. – № 4. – С. 12-16.
22. Nadakuditi R.R. *Sample eigenvalue based detection of high-dimensional signals in white noise using relatively few samples* / R.R. Nadakuditi, A. Edelman // *IEEE Trans. Signal processing.* – 2008. – Vol.56, No.7. – P. 2625-2638.
23. Василюшин В.И. Многофазный систолический вычислитель для реализации QR – алгоритмов, свободных от вычисления квадратного корня / В.И. Василюшин, А.Н. Колесников // *Відкриті інформаційні і комп'ютерні інтегровані технології: Зб. наук. пр.* – Х.: ДАУ “ХАІ”, 1999. – Вип. 3. – С. 105-109.

Поступила в редколлегию 3.11.2014

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

КОМБІНОВАНА ПЕЛЕНГАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ШУМОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ РАНДОМІЗАЦІЇ ВЛАСНИХ ВЕКТОРІВ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МАТРИЦІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА МЕТОДА ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЯ

В.І. Василюшин

В статті запропонований варіант стратегії комбінованої пеленгації джерел шумового випромінювання (ДШВ), оснований на методі Root-MUSIC з рандомізацією власних векторів (ВВ) кореляційної матриці спостереження. Для зменшення числа аномальних оцінок (викидів) в оцінках куткових координат ДШВ метода Root-MUSIC з рандомізацією ВВ використовується метод формування променя. Представлені результати імітаційного моделювання, що підтверджують підвищення точності пеленгації ДШВ в області порогового відношення сигнал-шум та обмеженого об'єму навчальної вибірки.

Ключові слова: комбінована пеленгація, власні значення, власні вектори, сингулярні значення, сингулярні вектори, просочування підпросторів, рандомізація.

COMBINED DIRECTION FINDING OF JAMMERS USING RANDOMIZATION OF EIGENVECTORS OF CORRELATION MATRIX OF THE OBSERVATION AND BEAMFORMER

V.I. Vasylyshyn

The strategy variant of combined direction finding of the jammers based on Root-MUSIC method with randomization of the eigenvectors of observation correlation matrix is proposed in the paper. The estimates of jammer angular coordinates of Root-MUSIC are obtained with using of the beamformer in order to reduce the number of abnormal estimates (outliers). The improvement of accuracy of jammer direction finding in the area of threshold signal-to-noise ratio and limited volume of learning sample is confirmed by simulations.

Keywords: combined direction finding, eigenvalues, eigenvectors, singular values, singular vectors, subspace leakage, randomization.