

УДК 621.391

В.И. Василишин

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СУРРОГАТНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

*В статье рассматривается задача адаптивной коррекции предварительной обработки наблюдаемых на фоне шума сигналов при их спектральном анализе методом Root-MUSIC с использованием технологии суррогатных данных, полученных рандомизацией фаз спектральных компонент наблюдений. Представлены результаты имитационного моделирования коррекции обработки наблюдений, которые показывают эффективность применения этой технологии для повышения точности оценивания компонент энергетического спектра сигнала при низких значениях отношения сигнал-шум (ОСШ). В отличие от неадаптивной коррекции получаемая с использованием адаптивной коррекции точность оценивания при высоких ОСШ сравнима с точностью исходного метода Root-MUSIC.*

**Ключевые слова:** суррогатные данные, собственноструктурные методы, коррекция.

### Введение

На сегодняшний день известно большое число методов пространственно-временного спектрального анализа (ПВСА) сигналов различной физической природы, обладающих разрешающими свойствами выше рэлеевского предела («сверхразрешения») [1 – 4]. Смысл и предельные характеристики «сверхразрешения» для различных применений были установлены Я. Д. Ширманом [1]. Точность оценивания спектральных компонент сигнала обуславливается уровнем шума, спектральным разносом его компонент и интервалом наблюдения. Эффективность оценивания часто определяется близостью ошибок оценивания к границе Крамера-Рао.

Задача «сверхразрешения» по частоте является актуальной радиолокационной задачей (например, «сверхразрешения» по частоте Доплера отраженных от групповых целей сигналов в импульсно-доплеровских радиолокаторах, при распознавании целей и т.д.), которая может решаться методами спектрального анализа [1 – 4].

Среди методов спектрального анализа со «сверхразрешением» особенное место занимают так называемые собственноструктурные методы (MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT, Min-Norm и другие) [2, 3]. Указанные методы находят также применение при решении задачи определения направления на источник излучения (эквивалентность этой задачи задаче оценивания спектра временного сигнала показана в [5]) и в ряде других задач. Применительно к задаче оценивания частоты гармонических сигналов они обеспечивают лучшие характеристики разрешения-измерения, чем авторегрессионный метод и метод, основанный на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) [2, 3].

При низком отношении сигнал-шум (ОСШ) или малом количестве данных эффективность спектрального анализа (точность оценивания, разрешающая способность) этими методами ухудшается. Это явление известно как пороговый эффект и встречается в результате появления аномальных оценок при оценивании частоты (направлений прихода (НП) сигналов) [6 – 7, 9 – 13].

Известны работы, направленные на понижение порогового ОСШ СС методов при оценивании НП нескольких сигналов, наблюдаемых на выходах антенной решетки в присутствии шума. Стратегия их совместного оценивания [6] (комбинированной пеленгации) подразумевает использование различных методов (формирование «банка» методов -bank) и их применение к ансамблю данных и связанной с ним выборочной ковариационной матрице. В [7] представлена псевдослучайная стратегия совместного оценивания НП (PR-JES). При этом используется рандомизация собственных векторов выборочной ковариационной матрицы. Данные работы основываются на новом классе технологий, объединенных общим термином «численный ресамплинг» (resampling) [8]. Наиболее известными являются метод «складного ножа» (jackknife) и бутстреп (bootstrap). Эти подходы позволяют формировать так называемые «псевдовыборки» в случае, когда нет возможности повторно получить истинные наблюдения (увеличить объем выборки). Одна из полиномиальных реализаций стратегии совместного оценивания (ССО) НП источников сигналов рассмотрена в работе [9]. В [10] показаны особенности реализации ССО с использованием несобственно-структурных методов ПВСА на основе адаптивных решетчатых фильтров.

Известен также вариант бутстреп, в котором к исходным данным добавляют малые независимые одинаково распределенные шумы [11 – 13]. При этом величина добавляемого псевдослучайного шума изменяется в соответствии с изменением дисперсии шума измерения (отношения сигнал-шум). Представляется целесообразным использовать эту идею [11 – 13] в данной работе при рассмотрении технологии суррогатных данных (surrogate data), продолженной в [14] для обнаружения нелинейности во временных рядах.

Технология суррогатных данных [14, 15], используемая при нелинейном анализе временных рядов, является развитием методов «численного ресамплинга». Среди алгоритмов формирования суррогатных данных можно выделить две группы:

- сохраняющие статистические свойства наблюдений;
- сохраняющие статистические и динамические свойства входных сигналов.

К первой группе можно отнести: алгоритм со случайным перемешиванием входного массива данных (random shuffle algorithm), алгоритм с использованием преобразования Фурье (Fourier transform algorithm), известный также как алгоритм с рандомизацией фазы Фурье-спектра наблюдений (random phase (RP) algorithm), алгоритм с подгонкой амплитуды после преобразования Фурье (amplitude adjusted Fourier transform algorithm). Ко второй -

ATS-алгоритм (attractor trajectory surrogates), алгоритм формирования псевдопериодических суррогатных данных (pseudo-periodic surrogate) [15]. Алгоритмы второй группы требуют гораздо большего числа операций для получения суррогатных данных.

ATS-алгоритм и его модификации использовались в работах [16 – 18] для эмпирической оценки отношения правдоподобия [16], повышения качества оценки параметров регулярных и хаотических сигналов, наблюдаемых на фоне аддитивного шума [17], уменьшения влияния шума в наблюдении хаотической несущей при передаче бинарного сообщения [18]. Вместе с тем в [17] при анализе применения метода суррогатных данных к регулярным сигналам рассмотрен частный случай оценивания одно-го гармонического сигнала в шуме.

Алгоритм с рандомизацией фазы Фурье-спектра наблюдений использовался для проверки гипотезы о принадлежности анализируемого временного ряда к классу линейных случайных процессов (линейно фильтрованный шум). По сгенерированным суррогатным данным и исходным данным определялись некоторые статистики. В случае их отличия гипотеза отклонялась. В качестве такой статистики для данного алгоритма выступает спектр мощности ряда, полученный с использованием преобразования Фурье.

В данной работе технология суррогатных данных с использованием рандомизации фаз Фурье-спектра наблюдения использована для коррекции обработки наблюдаемых на фоне шума сигналов при их спектральном анализе методом Root-MUSIC с использованием технологии суррогатных данных.

**Целью данной работы** является демонстрация возможности адаптивной коррекции эффективности рандомизации при формировании суррогатных данных для решения задач спектрального анализа.

### Постановка задачи спектрального анализа

Последовательность результатов наблюдения  $y(n)$ , состоящая из взятых через равные промежутки времени отсчетов  $V$  гармонических колебаний  $x_v(n) = \alpha_v \sin(\omega_v n + \varphi_v)$  и белого гауссовского шума  $e(n)$  описывается выражением [2, 3, 19]:

$$y(n) = \sum_{v=1}^V x_v(n) + e(n) = s(n) + e(n). \quad (1)$$

Здесь  $n = 0, \dots, N-1$ ,  $\alpha_v$  – амплитуда,  $\omega_v = 2\pi f_v$  – частота, а  $\varphi_v$  – фаза  $v$ -й синусоиды. Частота  $f_v$  связана с частотой аналогового сигнала (сигнала до дискретизации)  $f_{va}$  следующим соотношением:  $f_v = f_{va}/f_d$ , где  $f_d$  – частота дискретизации сигнала.

Используя методы спектрального анализа по наблюдению  $\{y(n)\}_{n=0}^{N-1}$ , необходимо дать оценки значениям частот  $\omega_v, v=1, \dots, V$ .

Полагаем, что  $\varphi_v$  – случайные независимые величины, равномерно распределенные на интервале  $[0, 2\pi)$ ,  $\omega_v \in [0, \pi)$ , а шум  $e(n)$  имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию  $\sigma^2$ .

Вектор входных данных длиной  $N$  представим в виде  $K$  векторов размером  $m > 2V$  [2, 3, 21] следующего вида

$$y(n) = [y(n) \dots y(n+m-1)]^T, \quad (2)$$

где  $K = N - m + 1, n = 1, \dots, K$ . Тогда модель (1) можно представить в матричном виде [2, 3, 19]:

$$y(n) = \mathbf{B}x(n) + e(n) = g(n) + e(n), \quad (3)$$

где  $x(n) - 2V \times 1$  вектор вида

$$x(n) = \begin{bmatrix} \alpha_1 \sin(\omega_1 n + \varphi_1) \\ \alpha_1 \cos(\omega_1 n + \varphi_1) \\ \vdots \\ \alpha_v \sin(\omega_v n + \varphi_v) \\ \alpha_v \cos(\omega_v n + \varphi_v) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$\mathbf{B} = [\mathbf{A}(\omega_1) \dots \mathbf{A}(\omega_v)] - m \times 2V$  матрица, в которой матрицы  $\mathbf{A}(\omega_v) = [\mathbf{a}_c(\omega_v) \quad \mathbf{a}_s(\omega_v)]$  состоят из векторов  $\mathbf{a}_c(\omega_v) = [1 \cos(\omega_v) \dots \cos((m-1)\omega_v)]^T$  и  $\mathbf{a}_s(\omega_v) = [0 \sin(\omega_v) \dots \sin((m-1)\omega_v)]^T$ , а вектор шума  $e(n) = [e(n) \dots e(n+m-1)]^T$ . Здесь  $()^T$  означает транспонирование.

С учетом представления (3) ковариационная матрица (КМ)  $y(n)$  имеет вид

$$\mathbf{R} = E[y(n)y^T(n)] = \mathbf{B}\mathbf{S}\mathbf{B}^T + \sigma^2\mathbf{I}, \quad (5)$$

где  $E$  – символ математического ожидания,  $\mathbf{S}$  – КМ сигналов ранга  $2V$ ,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица. Отметим, что для рассматриваемой модели данных ковариационная и корреляционная матрицы аналогичны [2, 3].

Выбор  $m > 2V$  определяет применимость СС методов (в этом случае  $\text{rank}(\mathbf{S}) = 2V$ ). Кроме того, величина  $m$  влияет на точность оценивания методом MUSIC (root-MUSIC) и на качество оценки КМ [3].

Оценка ковариационной матрицы размером  $m \times m$  имеет следующий вид

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K y(n)y^T(n) = \frac{1}{K} \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T, \quad (6)$$

где  $\mathbf{Y} = [y(1), \dots, y(K)] - m \times K$  матрица данных. В отличие от истинной КМ ее оценка не является тепловой.

Для моделирования предлагаемого подхода используем метод Root-MUSIC, который позволяет оценить частоты вычислением корней соответствующего полинома [3, 9, 13]:

$$P_{\text{tm}}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1})\hat{\mathbf{U}}_n\hat{\mathbf{U}}_n^H\mathbf{a}(z), \quad (7)$$

где  $\mathbf{a}(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T, z = \exp(j\omega)$ ,  $\hat{\mathbf{U}}_n - m \times (m - \hat{V})$  матрица собственных векторов (СВ) подпространства шума, получаемая в результате разложения по СВ и собственным значениям (СЗ) матрицы  $\hat{\mathbf{R}}$ .

Оценка числа гармонических колебаний может быть получена одним из известных методов – Акаике (AIC), Шварца – Риссанена (MDL) и др. [2, 3]. Особенностью случая с вещественными синусоидами есть то, что  $\hat{V} = 2V$  [2, 3].

Оценки частот получают по фазам  $\hat{V}/2$  корней с наибольшими модулями ( $z_v, v = 1, \dots, \hat{V}/2$ ):

$$\hat{f}_v = f_d \arg(z_v) / 2\pi. \quad (8)$$

Выбор  $f_d$ , не удовлетворяющий теореме Котельникова, будет приводить к необходимости устранения неоднозначности измерений.

### Адаптивная коррекция метода Root-MUSIC с использованием технологии суррогатных данных

В алгоритме формирования суррогатных данных с рандомизацией фаз компонент Фурье-спектра наблюдения суррогатные данные формируются в результате выполнения следующих операций: дискретного преобразования Фурье (ДПФ) исходных данных  $Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)e^{-j2\pi nk/N}, k = 0, \dots, N-1$ ,

рандомизации фаз  $\{\varphi_k\}_{k=0}^{N-1}$  полученного массива путем замены их значений на равномерно распределенные в интервале  $[0, 2\pi]$  случайные величины и его обратного ДПФ [14]. При этом, чтобы обратное преобразование Фурье было вещественным, необходимо произвести симметрирование фаз. Индексу  $k$  соответствует физическая  $\omega_k = k2\pi f_d / N$  или нормированная частота  $\bar{\omega}_k = k2\pi / N$ .

В [11 – 13] при формировании псевдослучайного шума к исходным данным для обеспечения асимптотической эффективности предложенного подхода дисперсия псевдослучайного шума уменьшалась по мере увеличения ОСШ. Поэтому представляет интерес поиск возможности адаптивного регулирования дисперсии суррогатного шума.

Для управления этой величиной рандомизацию фаз Фурье-спектра наблюдения в [20] предложено выполнять ее следующим образом

$$\varphi_{\text{randcontr}}(\omega_k) = \varphi(\omega_k) + \gamma\varphi_{\text{rand}}(\omega_k), \quad (9)$$

где  $\omega_k = k2\pi f_d / N -$  частоты анализа ДПФ, называемые также бинами ДПФ,  $\varphi(\omega_k) -$  фазы Фурье-

спектра наблюдения,  $\varphi_{\text{rand}}(\omega_k) \in [0, 2\pi]$  – случайные числа с равномерным законом распределения,  $\gamma \in [0, 1]$  – параметр, изменяющий эффективность (в [20] strength – силу, интенсивность) рандомизации фаз Фурье-спектра наблюдения.

Представляется целесообразным объединить идеи [11 – 13, 20] и изменять  $\gamma$  пропорционально ОСШ. По мере увеличения ОСШ, когда точность оцениваемых параметров СС методами без использования рандомизации и так высока, эффективность рандомизации необходимо уменьшать.

Для этого в [11 – 13] дисперсия аддитивно добавляемого псевдошума  $\sigma_z^2$  определялась как  $\sigma_z^2 = p\sigma^2$ , где  $p < 1$ . Оценка дисперсии шума наблюдения  $\sigma^2$  определялась как [3, 11 – 13]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(M-V)} \sum_{i=\hat{V}+1}^M \hat{\lambda}_i = \frac{1}{(M-V)} \text{trace}(\hat{\Lambda}_n). \quad (10)$$

Здесь  $\hat{\Lambda}_n$  – матрица СЗ  $\hat{\lambda}_i, i = \hat{V}+1, \dots, M$  подпространства шума КМ  $\hat{\mathbf{R}}$ ,  $\text{trace}()$  – след матрицы.

В данной работе для формирования ковариационной матрицы вместо исходных данных используются суррогатные данные, а параметр  $\gamma$  должен изменяться пропорционально ОСШ.

Часто мощность гармонических компонент предполагают фиксированной, и ОСШ определяется дисперсией шума, т.е.  $\text{ОСШ} = 10 \log_{10}(1/\sigma^2)$  [2, 3]. В этом случае можно оценивать дисперсию шума наблюдения  $\sigma^2$  по (10) и использовать  $\hat{\sigma}$  вместо  $\gamma$ . Если мощность гармонических компонент неизвестна – необходимо также вычислять амплитуды (мощности) гармонических компонент одним из известных методов [3].

Таким образом, в отличие от [20] перед формированием суррогатных данных необходимо определять величину ОСШ и  $\gamma$ , а рандомизацию фаз Фурье-спектра наблюдения осуществлять согласно (9). По ансамблю векторов суррогатных данных формируется ансамбль соответствующих им КМ и оценивается усредненная КМ. Эта матрица содержит необходимую информацию для спектрального анализа с использованием метода Root-MUSIC и других СС методов.

Преимущество предлагаемого подхода по сравнению с [9, 11 – 13] состоит в меньшем объеме вычислений, отсутствии потребности знания предварительных оценок частот сигналов.

В ходе моделирования предполагались наличие двух равномошных гармонических сигнала с  $f_1 = 0.2$  и  $f_2 = 0.215$ . Предел разрешения по Рэлею для рассматриваемого случая  $(f_d/N) = 0.0156$ . Таким образом,  $\Delta f = 0.015 < (f_d/N)$ . Кроме того,  $N = 64$ ,

$m = 45$ ,  $N_s = 50$ . Предполагалось, что определение числа гармонических компонент выполнено на этапе обнаружения и равно  $V = 2$ . Выполнялось  $L = 1000$  независимых повторений процедуры спектрального оценивания для различных ОСШ, определяемых как  $10 \log_{10}(1/\sigma^2)$ . Вычисление метода MUSIC осуществлялось согласно выражения

$$P_{\text{MUSIC}}(\omega) = 1 / \left( \sum_{g=2^{*}V+1}^m \left| \mathbf{a}^H(\omega) \mathbf{v}_g \right|^2 \right), \quad (11)$$

где  $\mathbf{a}(\omega) = \mathbf{a}_c(\omega) + i\mathbf{a}_s(\omega)$ . Так как вектор  $\mathbf{a}(\omega) = [1, \exp(j\omega), \dots, \exp(j(m-1)\omega)]^T$ , то для упрощения вычисления (11) использовалось ДПФ.

В результате суммарная среднеквадратическая ошибка оценивания (RMSE) для выбранного метода спектрального оценивания  $V$  компонент сигнала может определяться выражением [7]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{LV} \sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^V [(\hat{f}_{v,l} - f_v)^2]}, \quad (12)$$

где  $\hat{f}_{v,l}$  обозначает оценку частоты  $v$ -го гармонического колебания, полученную в  $l$ -м повторении,  $f_v$  – истинное значение частоты.

На рис. 1 показаны зависимости среднеквадратических ошибок оценивания (СКО) частот от ОСШ, полученные методами MUSIC и Root-MUSIC, а также при коррекции КМ, полученных по суррогатным реализациям с рандомизацией фаз компонент Фурье-спектра наблюдения без адаптации дисперсии суррогатного шума (Root-MUSIC with averaged CM- RP) и с ее адаптацией (Root-MUSIC with averaged CM- RP (ADAPTIVE)). Использование усредненной КМ в англоязычных названиях методов на рис. 1 отмечено словами «with averaged CM».

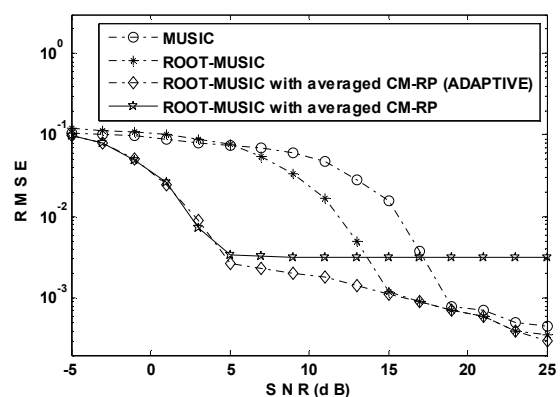


Рис. 1. Зависимость СКО оценивания частот гармонических колебаний от ОСШ

Сравнение зависимостей, показанных на рис. 1, позволяет сделать следующие выводы. Пороговое ОСШ метода MUSIC выше, чем у Root-MUSIC. Использование суррогатных данных, полученных рандомизацией фаз компонент Фурье-спектра наблю-

дения, приводит к уменьшению СКО оценок частот гармонических колебаний методом Root-MUSIC при ОСШ, ниже порогового ОСШ (на рис. 1 кривая с надписью Root-MUSIC with averaged CM-RP). Однако, имеет место насыщение СКО оценок при увеличении ОСШ выше определенного значения (на рис. 1 6 дБ), когда вклад так называемого суррогатного шума [17, 20] в точность спектрального анализа становится преобладающим.

Адаптивное изменение эффективности рандомизации при формировании суррогатных данных с рандомизацией фаз Фурье-спектра наблюдений позволяет ослабить ограничение коррекции классических методов спектрального анализа на примере метода Root-MUSIC (на рис. 1 кривая с надписью Root-MUSIC with averaged CM-RP (ADAPTIVE)), которое проявляется насыщением величины СКО оценок спектральных компонент. Из анализа рис. 1 видно, что в случае адаптивной коррекции метода Root-MUSIC при больших ОСШ его СКО практически совпадает с СКО исходного метода Root-MUSIC (эффект насыщения СКО отсутствует).

Для более детального анализа эффективности коррекции обработки сигналов с использованием технологии суррогатных данных на рис. 2 показаны вероятности разрешения-измерения частот гармонических колебаний для исследуемых методов. Условия моделирования были выбраны такими же, как и при получении результатов, показанных на рис. 1.

При моделировании спектральные компоненты гармонического колебания считались разрешенными, если выполнялось условие [7]:

$$\sum_{v=1}^2 |\hat{f}_{v,1} - f_v| < |f_1 - f_2|. \quad (13)$$

Из анализа рис. 2 видно, что коррекция спектрального анализа с использованием технологии суррогатных данных приводит к увеличению вероятности разрешения-измерения спектральных компонент методом Root-MUSIC при низком ОСШ. Кривые, соответствующие адаптивной и неадаптивной коррекции, практически совпадают.

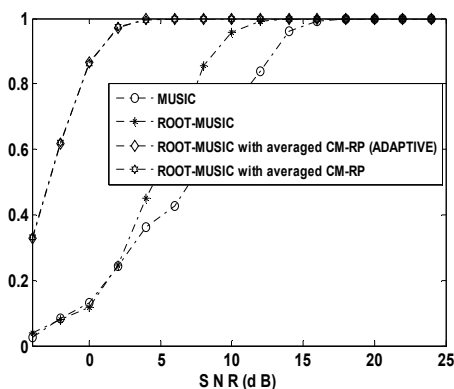


Рис. 2. Зависимости вероятностей разрешения-измерения спектральных компонент от ОСШ

Для определения эффективности рандомизации и, соответственно, использования суррогатных данных, введем коэффициент использования суррогатных данных (coefficient of surrogate data (SD) use):

$$K_{исд} = \sigma_{МСА} / \sigma_{МСАСД}, \quad (13)$$

где  $\sigma_{МСА}$  и  $\sigma_{МСАСД}$  – СКО оценивания частот метода спектрального анализа (МСА) без использования и с использованием суррогатных данных (МСАСД).

Для условий моделирования, которые были выбраны при получении результатов, показанных на рис. 1, на рис. 3 приведены зависимости коэффициента использования суррогатных данных для случаев адаптивной и неадаптивной коррекции спектрального анализа методом Root-MUSIC. Легко увидеть, при низких ОСШ  $K_{исд}$  возрастает до определенного значения, а потом уменьшается. Его уменьшение указывает на снижение эффективности использования суррогатных данных по мере уменьшения шума измерения (увеличения ОСШ).

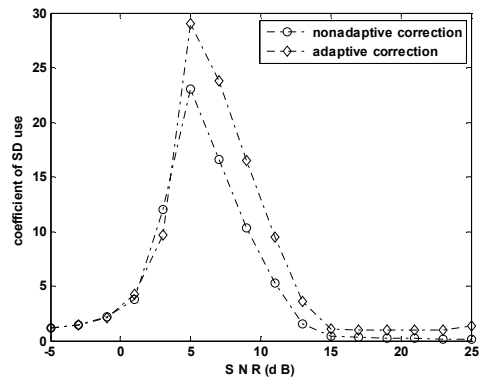


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования суррогатных данных от ОСШ

При высоких ОСШ и адаптивной коррекции спектрального анализа  $K_{исд}$  примерно равен единице (СКО исходного метода Root-MUSIC примерно равна СКО метода Root-MUSIC, использующего суррогатные данные), а при неадаптивной коррекции стремится к нулю, что указывает на низкую эффективность применения суррогатных данных без регулирования дисперсии суррогатного шума в области высоких ОСШ.

## Выводы

Использование суррогатных данных, сформированных при адаптации эффективности рандомизации фаз Фурье-спектра наблюдения к ОСШ, позволяет уменьшить вклад шума в наблюдении и улучшить точность оценок частот гармонических сигналов методом Root-MUSIC при низком сигнал-шум, когда измерительный шум доминирует над так называемой суррогатной помехой. При высоких ОСШ точность исходного Root-MUSIC и с адаптивной коррекцией сравнимы. Универсальность предло-

женного підходу состоит в можливості його застосування і для інших методів спектрального аналізу.

### Список литературы

1. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов / Я.Д. Ширман. – М.: Сов. радио, 1974.
2. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
3. Stoica P. Introduction to spectral analysis / P. Stoica, R.L. Moses. – Prentice hall, 1997.
4. Ширман Я.Д. Некоторые этапы развития и проблемы теории и техники разрешения радиолокационных сигналов / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос, Д.И. Леховицкий // Радиотехника. – 1997. – №1. – С. 31-42.
5. Jonson D.H. The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems / D.H. Jonson // Proc. of IEEE. – 1982. – Vol. 90, No.7. – P. 126-138.
6. Gershman A.B. Improved DOA estimation via pseudo-random resampling of spatial spectrum / A.B. Gershman, J.F. Bohme // IEEE Signal Processing Lett. – 1997. – Vol. 4. – P. 54-57.
7. 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.
8. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерно-го статистического анализа / Б. Эфрон. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
9. 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, Netherlands: proc. of conf. – 2004. – P. 317-320.
10. 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. Мыслик // Антенны. – 2003. – Вып. 12(79). – С. 9-15.
11. Gershman A.B. A pseudo-noise approach to direction finding / A.B. Gershman, J.F. Bohme // Signal Processing. – 1998, May. – Vol. 71. – P. 1-13.
12. 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). – P. 246-249.

13. Vasylyshyn V.I. Improved Beamspace ESPRIT-based DOA Estimation via Pseudo-Noise Resampling / V.I. Vasylyshyn // European Radar Conference. – Amsterdam (Netherlands), 2012. – P. 238-241.

14. Theiler J. Testing for nonlinearity in time series: The method of surrogate data / J.S. Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, J.D. Farmer // Physica D 58. – 1992. – P. 77-94.

15. Small M. Applied Nonlinear Time Series Analysis Applications in Physics, Physiology and Finance / M. Small. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2005. – 245 p.

16. Костенко П.Ю. Непараметрический BDS-обнаружитель хаотических сигналов на фоне белого шума / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, С. Н. Симоненко, А.Н. Барсуков // Радиотехника. – 2011. – Том 54, №1. – С.23-31. – (Изв. Вузов).

17. Костенко П.Ю. Использование суррогатных сигналов для повышения качества оценки параметров регулярных и хаотических сигналов, наблюдаемых на фоне аддитивного шума / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, В.В. Слободянюк, Д.С. Яковенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ДП «ЦНДІ НІУ», 2010. – Вып. 4(16). – С. 28-32.

18. Костенко П.Ю. Повышение эффективности когерентной обработки хаотических сигналов при передаче бинарных сообщений с использованием суррогатных сигналов / П.Ю. Костенко, В.И. Василишин, С. Н. Симоненко, О.В. Высоцкий, Д.С. Яковенко // Радиотехника. – 2012. – Том 55, №7. – С. 24-33. – (Изв. Вузов).

19. Stoica P. MUSIC estimation of real-valued sine wave frequencies / P. Stoica, A. Eriksson // Signal Processing. – 1995, April. – Vol. 42, No.4. – P. 139-146.

20. Dahlhaus R. Mathematical Methods in Signal Processing and Digital Image Analysis / R. Dahlhaus, J. Kurths, P. Maass, J. Timmer. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.

Поступила в редколлегию 8.02.2013

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

### АДАПТИВНА КОРЕКЦІЯ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ СУРОГАТНИХ ДАНИХ В ЗАДАЧАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

В.І. Василишин

В статті розглядається задача адаптивної корекції попередньої обробки сигналів, що спостерігаються на фоні шуму, при їх спектральному аналізі методом Root-MUSIC з використанням технології сурогатних даних, отриманих рандомізацією фаз спектральних компонент спостережень. Представлені результати імітаційного моделювання адаптивної корекції обробки спостережень, які показують ефективність застосування цієї технології для підвищення точності оцінювання компонент енергетичного спектра сигналу при низьких значеннях відношення сигнал-шум (ВСШ). На відміну від неадаптивної корекції точність оцінювання, що отримується з використанням адаптивної корекції при високих ВСШ, порівняна з точністю початкового метода Root-MUSIC.

**Ключові слова:** сурогатні дані, власноструктурні методи, адаптивна корекція.

### ADAPTIVE CORRECTION OF THE PRELIMINARY SIGNAL PROCESSING WITH USING THE SURROGATE DATA TECHNOLOGY IN THE SPECTRAL ANALYSIS PROBLEMS

V.I. Vasylyshyn

The adaptive correction problem of preliminary processing of the signals observed on noise background in the process of spectral analysis of the signals by Root-MUSIC method when using the surrogate data technology, obtained by randomization of observation component phase. The simulation results of the adaptive correction of observation processing are presented that show the efficiency of application this technology for the increasing of estimation accuracy of components of signal power spectrum in the case of low signal-to-noise ratios (SNR). The estimation accuracy obtained with using the adaptive correction as opposed to nonadaptive correction in the case of high SNR is compatible with accuracy of initial Root-MUSIC method.

**Keywords:** surrogate data, eigenstructure methods, adaptive correction.