

УДК 004.89

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ МАЛОЭЛЕМЕНТНОГО МОНОИМПУЛЬСНОГО ПЕЛЕНГАТОРА В УСЛОВИЯХ МОЩНЫХ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

С.В. КОЗЛОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19 февраля 2018

Аннотация. Рассматривается алгоритм пеленгации источника полезного сигнала в малоэлементном моноимпульсном пеленгаторе на базе квадрантной антенной решетки на основе многослойного перцептрона. Отличительной особенностью алгоритма является использование в качестве входной информации модулей и фаз элементов нормированной верхнетреугольной корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов. Приводятся результаты сравнительного анализа точности пеленгации полезного сигнала, достигаемой при использовании нейросетевого и статистического алгоритмов функционирования.

Ключевые слова: квадрантная антенная решетка, корреляционная матрица, нейронная сеть, пеленгатор, пространственная компенсация помех.

Abstract. The algorithm of direction finding of a useful signal source in a low-element monopulse direction finder with a quadrant antenna array based on a multilayer perceptron is considered. A distinctive feature of the algorithm is the use of modules and phases of elements of the normalized upper-triangular correlation matrix of processes at the outputs of the receiving channels as input information. The results of comparative analysis of the accuracy of direction finding of the useful signal achieved by using neural network and statistical algorithms of functioning are presented.

Keywords: quadrant antenna array, correlation matrix, neural network, direction finder, spatial noise compensation.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 31-37
Signal processing of little elements monopulse direction finder in the conditions of strong interference using neural networks
S.V. Kozlov

Введение

Обеспечение высокой помехоустойчивости моноимпульсных пеленгаторов средств радиолокации и радиомониторинга достигается за счет внедрения оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки принимаемых сигналов. К их числу относятся алгоритмы пространственной компенсации помех, воздействующих по боковым лепесткам и скатам главного лепестка диаграмм направленности основных каналов пеленгатора [1, 2], и алгоритмы, реализующие современные методы «сверхразрешения» источников радиоизлучения [3, 4]. К наиболее сложным следует отнести задачу обеспечения помехоустойчивости относительно малоэлементных антенных систем, в частности, квадрантной антенной системы, полученной разделением общей антенной решетки на четыре подрешетки или при использовании четырех идентичных независимых антенн. Теоретически для указанной антенной системы с четырьмя независимыми приемными каналами (степенями свободы) могут быть получены алгоритмы обработки, обеспечивающие выделение сигнала

и пеленгацию источника радиоизлучения (ИРИ) в пределах главного лепестка диаграммы направленности (ДН) на фоне перекрывающихся по спектру сигналов до трех ИРИ, находящихся в боковых лепестках ДН. Однако практическая реализация таких алгоритмов затруднена высокими требованиями к быстродействию вычислительных средств. В [5] предложен алгоритм функционирования моноимпульсного пеленгатора на базе квадрантной антенной решетки, основанный на адаптивном управлении углом ориентации двух ограничений на значения ДН адаптированных суммарного и разностного каналов, обеспечивающий компенсацию одного источника помех по боковым лепесткам ДН.

Весьма перспективным для моноимпульсной пеленгации является внедрение нейросетевых алгоритмов обработки сигналов, обладающих способностью к выявлению скрытых закономерностей и естественным вычислительным параллелизмом [6, 7]. В [8] предложено использование нейронной сети (НС) для пеленгации радиолокационных целей. В [9] рассмотрен нейросетевой подход к обработке сигналов моноимпульсной локации, базирующийся на аппроксимации с использованием многослойного перцептрона пространственного распределения мощности источников радиоизлучения. Входными данными НС являлись измеренные мощности сигналов всех каналов антенной системы. Использование только амплитудной составляющей структуры сигналов, принимаемых элементами антенной системы, существенно ограничивает возможности алгоритма [9] в условиях интенсивных помех. В [10] НС использована как универсальный аппроксиматор сигналов суммарного и разностного каналов моноимпульсной приемной системы. В работах [11–13] исследованы НС, настраиваемые по дискретному градиентному алгоритму и алгоритму рекуррентного обращения выборочной корреляционной матрицы входных сигналов. В указанных работах НС использовалась для реализации известных статистических алгоритмов формирования вектора весовых коэффициентов адаптивной антенной системы, и непосредственное применение полученных результатов для малоэлементных пеленгаторов с компенсацией помех является затруднительным.

В этой связи представляет интерес исследование возможности обработки сигналов малоэлементного моноимпульсного пеленгатора в условиях интенсивных помех по боковым лепесткам ДН приемных каналов с использованием искусственных НС.

Целью настоящей работы является обоснование указанного алгоритма и проведение сравнительного анализа его эффективности с известным статистическим.

Исходные данные и обоснование алгоритма

Имеется квадрантная антенная решетка, полученная разбиением общей, для определенности круглой, антенной решетки на четыре идентичные подрешетки – квадранты 1.1–1.4, представляющие собой парциальные приемные каналы с ДН $\dot{F}_i(\alpha, \beta)$, $i = \overline{1, 4}$ (рис. 1). Необходимо построить нейросетевой алгоритм (НА), обеспечивающий пеленгацию источника полезного сигнала в пределах главного лепестка ДН парциальных каналов при наличии источников помех, воздействующих по боковым лепесткам ДН парциальных каналов. Для выявления принципиальной возможности построения НА и основных закономерностей ограничимся случаем наличия единственного источника помех по боковым лепесткам.

Выходные сигналы \dot{Y}_i парциальных каналов определяются выражениями

$$\dot{Y}_i = \dot{F}_i(\alpha_c, \beta_c) \dot{Y}_c + \dot{F}_i(\alpha_n, \beta_n) \dot{Y}_n + \dot{Y}_{ш_i}, \quad (1)$$

где $\alpha_{c(n)}, \beta_{c(n)}$ – азимут и угол места источника полезного сигнала (помехи); \dot{Y}_c – отсчеты сигнала (помехи) на выходах изотропной приемной антенны с фазовым центром в центре антенной решетки; $\dot{Y}_{ш_i}$ – шумы приемных каналов; k – номер отсчета.

Обоснование НА включает определение входных и выходных данных, структуры и алгоритмов обучения НС. При этом фактором, в значительной степени определяющим возможность построения, обучения и качественные характеристики нейросетевого алгоритма, являются его входные данные.

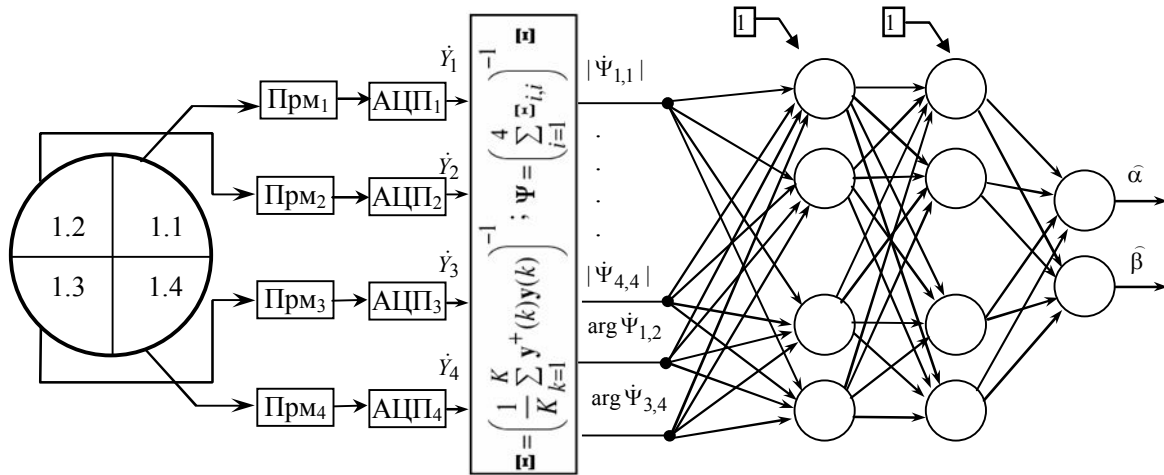


Рис. 1. Структуры приемной системы и нейронной сети для оценки азимута и угла места источника полезного сигнала

Отметим, что специфика задач пеленгования с позиций построения НА заключается в широком, 40 дБ и более, динамическом диапазоне выходных сигналов парциальных каналов. При этом мощность помеховой составляющей в типичных случаях может на десятки децибел превышать мощность сигнальной составляющей. Это существенно затрудняет нормирование входных сигналов и, как следствие, возможность обучения НС.

С учетом указанных обстоятельств в качестве основы для формирования вектора входных сигналов НА используем оценку Ξ обратной корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов:

$$\Xi = \hat{\Phi}^{-1}, \quad (2)$$

где

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{y}^+(k)\mathbf{y}(k) \quad (3)$$

– оценка корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов за заданное число отсчетов K ; $\mathbf{y}(k) = (\dot{Y}_1(k), \dot{Y}_2(k), \dot{Y}_3(k), \dot{Y}_4(k))$ – вектор-столбец отсчетов сигналов на выходах приемных каналов в k -й момент времени.

Правомочность использования оценки (2) как основы для формирования вектора входных сигналов НА определяется тем, что в ее структуре (как и в структуре матрицы $\hat{\Phi}$) содержится вся доступная информация об угловых координатах источников сигналов для многоканальных приемных систем, функционирующих по известным алгоритмам компенсации помех [1, 2, 14] или сверхразрешения [3, 4]. При этом использование обратной матрицы Ξ в сравнении с $\hat{\Phi}$ более предпочтительно для построения НА, так как разброс значений ее элементов, особенно при большой мощности воздействующих по боковым лепесткам ДН приемных каналов помех, оказывается существенно больше.

Матрица Ξ – эрмитова с комплексными элементами вне главной диагонали. Так как нормированные собственные векторы матрицы, определяющие угловые координаты источников сигналов, не изменяются при умножении матрицы на любое, отличное от нуля, число, осуществим нормирование матрицы на ее след:

$$\Psi = \left(\sum_{i=1}^4 \Xi_{i,i} \right)^{-1} \Xi, \quad (4)$$

при этом гарантируется, что модуль любого элемента матрицы окажется меньше единицы.

Элементы матрицы Ψ удовлетворяют условию $\dot{\Psi}_{i,j} = \Psi_{j,i}^*$, следовательно,

достаточно использовать матрицу Ψ в верхнетреугольном представлении.

Сформируем вектор \mathbf{p} входных данных НА, выделив модули

$$p_m = |\dot{\Psi}_{i,j}|, i = \overline{1,4}; j = \overline{i,4}; 0 \leq p_m \leq 0,5, m = \overline{1,10} \quad (5)$$

и фазы (с приведением их к диапазону $[0; 1]$)

$$p_n = 1 + \frac{1}{\pi} \arg \dot{\Psi}_{i,j}, i = \overline{1,3}; j = \overline{i+1,4}; 0 \leq p_n \leq 1; n = \overline{11,16} \quad (6)$$

десяти элементов матрицы Ψ в верхнетреугольном представлении.

В качестве выходной информации принимаются оценки азимута $\hat{\alpha} / \Delta\alpha_{0,5}$ и угла места $\hat{\beta} / \Delta\beta_{0,5}$ источника излучения в пределах главного лепестка ДН парциальных каналов, нормированные к ширине главного лепестка ДН парциального канала. При этом $0 \leq \hat{\alpha} / \Delta\alpha_{0,5} (\hat{\beta} / \Delta\beta_{0,5}) \leq 1$.

Структура предлагаемой НС совместно со структурой приемного тракта приведена на рис. 1. Использование нормировки и разделение недиагональных элементов корреляционной матрицы на модуль и фазу позволило построить НС с действительными входными и выходными сигналами, смещениями и функциями активации. Входной слой имеет 16 входов. Число скрытых слоев с полным набором связей между нейронами различных слоев может составлять от одного до трех с сигмоидальной функцией активации и смещением. Выходной слой имеет линейную функцию активации.

Настройка НС осуществляется путем минимизации среднего квадрата ошибки вида

$$E = \sum_{\ell=1}^L \left\{ (\hat{\alpha}_{\ell} - \alpha_{c_{\ell}})^2 + (\hat{\beta}_{\ell} - \beta_{c_{\ell}})^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где L – число образцов в эпохе обучения; $\alpha_{c_{\ell}}, \beta_{c_{\ell}}$ – истинные значения азимута и угла места источника полезного сигнала для ℓ -го предъявляемого образца.

Результаты обучения нейронной сети и моделирования

Для обучения НС использовался инструмент NNTool пакета MathLab. Входные сигналы НС формировались для квадрантной антенной решетки диаметром $D / \lambda = 10$. Число приемных элементов в квадранте антенной решетки составляло 75, ширина ДН квадранта по уровню 0,5 от максимальной мощности при этом составило $\Delta\alpha_{0,5} = \Delta\beta_{0,5} = 6^\circ$.

Входные данные, используемые для обучения сети, формировались путем последовательного перемещения углового положения источника полезного сигнала в сетке по азимуту и углу места от -3° до 3° с шагом $0,5^\circ$ для мощности источника полезного сигнала $P_c = 0, 1; 1; 10$ и последовательного перемещения углового положения источника помехи в сетке по азимуту и углу места от $\alpha(\beta)_n^{\min}$ до $\alpha(\beta)_n^{\max}$ с шагом $\delta\alpha(\beta)_n$ для мощности источника помехи $P_n = 30; 40; 50$ дБ. Для обучения использовался стандартный метод Левенберга-Марквардта при числе эпох обучения 1000–10000.

Отметим, что при указанных параметрах сигналов и помех получение точных оценок угловых координат источника полезного сигнала с использованием традиционной суммарно-разностной обработки без компенсации помех исключается [5].

На рис. 2 приведены результаты обучения НС в виде зависимости оценок азимута источника полезного сигнала для обучающей выборки. НС имела по 24 нейрона в двух скрытых слоях. Для обучения использовалось 5000 эпох при $\alpha_n^{\min} = 20^\circ, \alpha_n^{\max} = 22^\circ, \beta_n^{\min} = 15^\circ, \delta\alpha(\beta)_n = 0,5^\circ, \beta_n^{\max} = 17^\circ$. Жирной ступенчатой линией показаны истинные азимуты полезного сигнала для соответствующего образца эпохи обучения. Достигнутое

за заданное число эпох обучения значение среднеквадратической ошибки по обучающей выборке составило $\sigma_\alpha = 0,04^\circ$. При увеличении числа эпох ошибка может быть уменьшена.

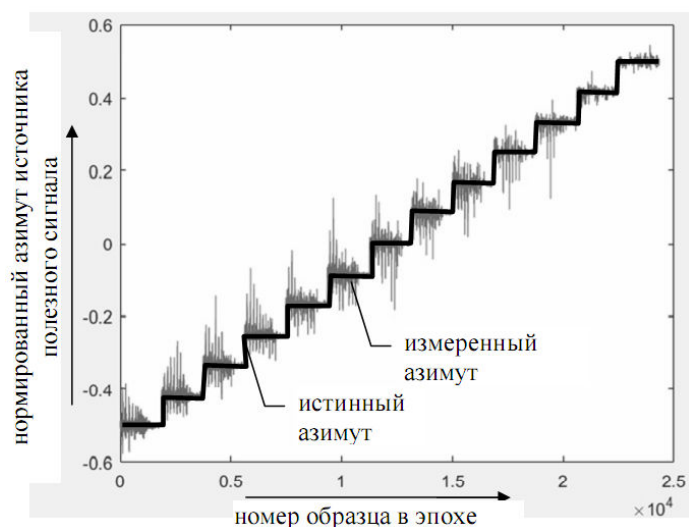


Рис. 2. Результаты обучения нейронной сети

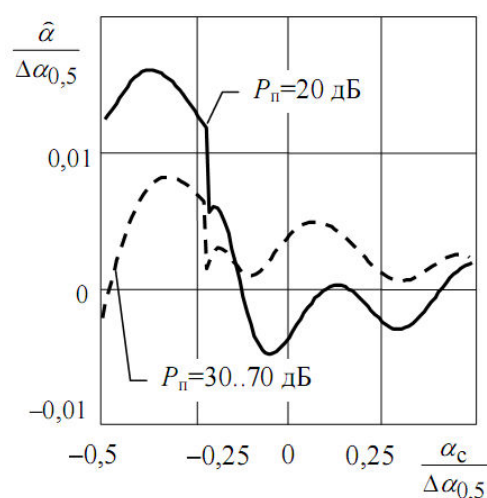


Рис. 3. Зависимость ошибки пеленгации от азимута источника полезного сигнала для различных значений мощности источника помех

На рис. 3 приведены зависимости ошибки оценки $(\hat{\alpha} - \alpha_c) / \Delta\alpha_{0,5}$ от истинного азимута $\alpha / \Delta\alpha_{0,5}$ источника полезного сигнала, построенные для НС, обученной для вышеуказанной комбинации параметров, при $\beta_c = -1,25^\circ$, $\alpha_n = 20,25^\circ$, $\alpha_n = 15,25^\circ$ (все параметры не использовались в обучающей выборке) при $P_c = 0,1$ для различных значений мощности помехи в пределах $P_n = 20 \dots 70$ дБ.

Как видно из полученных зависимостей, изменение углового положения источника полезного сигнала с шагом $0,5^\circ$ при обучении является достаточным для формирования у НС обобщающих свойств. Аналогичный вывод следует по результатам моделирования и в части мощности источников полезного сигнала и помех, когда достаточен шаг обучения $5 \dots 10$ дБ. В частности, когда $P_n = 20$ дБ, то есть на 10 дБ меньше значения, используемого при обучении, ошибка пеленгации возрастает, но при этом остается достаточно малой, не превышающей 2 % от ширины главного лепестка ДН парциальных каналов.

Более жесткие требования характерны для шага перемещения источника помех при обучении НС. Установлено, что требуемый шаг формирования обучающей выборки по угловым координатам источника помех должен составлять примерно $\delta\alpha(\beta)_n / \Delta\alpha_{0,5} \approx 0,25$. Полученная величина хорошо согласуется с шириной «нулей» адаптированной ДН при проведении процедуры пространственной компенсации помех с использованием известных статистических алгоритмов [1–3]. При таком, достаточно малом шаге изменения углового положения источника помех объем обучающей выборки резко возрастает. Для обеспечения запоминания нейронной сетью расширенного набора исходных данных требуется адекватное увеличение числа нейронов в скрытых слоях.

Наряду с использованием обратной Ξ исследовался вопрос возможности использования для обучения НС непосредственно оценки $\hat{\Phi}$ корреляционной матрицы процессов на выходе приемных каналов. Указанный вариант также является возможным, однако в этом случае резко возрастает время обучения и требуемое число нейронов в скрытых слоях сети. Точности пеленгации, достигаемые в предлагаемом НА и известном статистическом алгоритме [5], для аналогичных условий функционирования оказываются сравнимыми и составляют 2...3 % от ширины главного лепестка ДН приемных каналов.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о перспективности использования нейросетевых алгоритмов обработки сигналов в моноимпульсных пеленгаторах в условиях интенсивных помех по боковым лепесткам диаграмм направленности приемных каналов. В качестве входной информации целесообразно использовать нормированные элементы оценки обратной корреляционной матрицы процессов на выходе приемных каналов в верхнетреугольном представлении. Представляет интерес распространение полученных результатов на суммарные и фазовые пеленгаторы с многоканальными антенными системами, в том числе при реализации сверхразрешения источников радиоизлучения в пределах главного лепестка ДН.

Список литературы

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
2. Карпухин В.И., Козлов С.В., Сергеев В.И. Синтез вариантов структуры радиолокационных измерителей угловых координат с адаптивной пространственной компенсацией помех // Антенны. 2010. № 6. С. 71–76.
3. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
4. Чижов А.А. Сверхрелеевское разрешение: преодоление фактора некорректности обратной задачи рассеяния и проекционная радиолокация. М.: Красанд, 2010. 104 с.
5. Козлов С.В., Сергеев В.И., Семенякин Д.О. Способ пространственной компенсации помех в моноимпульсном пеленгаторе на базе квадрантной антенной решетки // Антенны. 2017. № 6. С. 45–51.
6. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника, 2009. 432 с.
7. Нейрокомпьютеры в системах обработки сигналов / Под ред. Ю.В. Гуляева и А.И. Галушкина. М.: Радиотехника, 2003. 344 с.
8. Гаврилов К.Ю., Богословская М.А. Применение нейронных сетей в задачах пеленгации радиолокационных целей // Инф.-аналит. журнал «Фазотрон». 2007. № 3–4.
9. Морозова Е.О., Овчинников П.Е., Семенова М.Ю. Нейросетевая обработка сигналов моноимпульсной локации // Вестн. Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. 2013. № 6. С. 62–66.
10. Зимина С.В. Статистические характеристики искусственной нейронной сети с дискретным градиентным алгоритмом настройки с учетом флуктуаций весовых коэффициентов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2006. № 10. С. 9–15.
11. Зимина С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственной нейронной сети с алгоритмом рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы выходных сигналов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2007. № 5. С. 3–7.
12. Карпухин В.И., Козлов С.В., Сергеев В.И. Пеленгационные и флуктуационные характеристики амплитудных суммарно-разностных измерителей угловых координат с пространственной компенсацией помех // Антенны. 2010. № 4. С. 59–66.

References

1. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptivnye antennnye reshjotki. M.: Radio i svjaz', 1986. 448 s. (in Russ.)
2. Karpuhin V.I., Kozlov S.V., Sergeev V.I. Sintez variantov struktury radiolokacionnyh izmeritelej uglovyh koordinat s adaptivnoj prostranstvennoj kompensaciej pomех // Antenny. 2010. № 6. S. 71–76. (in Russ.)
3. Ratynskij M.V. Adaptacija i sverhraszreshenie v antennnyh reshetkah. M.: Radio i svjaz', 2003. 200 s. (in Russ.)
4. Chizhov A.A. Sverhrjeleevskoe razreshenie: preodolenie faktora nekorrektnosti obratnoj zadachi rassejaniya i proekcionnaja radiolokacija. M.: Krasand, 2010. 104 s. (in Russ.)
5. Kozlov S.V., Sergeev V.I., Semenjakin D.O. Sposob prostranstvennoj kompensacii pomех v monoimpul'snom pelengatore na baze kvadrantnoj antennoj reshetki // Antenny. 2017. № 6. S. 45–51. (in Russ.)
6. Tatzov A.L. Nejronnye seti v zadachah radiolokacii. M.: Radiotehnika. 2009. 432 s. (in Russ.)
7. Nejrokomp'jutery v sistemah obrabotki signalov / Pod red. Ju.V. Guljaeva i A.I. Galushkina. M.: Radiotehnika, 2003. 344 s. (in Russ.)
8. Gavrilov K.Ju., Bogoslovskaja M.A. Primenenie nejronnyh setej v zadachah pelengacii radiolokacionnyh celej // Inf.-analit. zhurnal «Fazotron». 2007. № 3–4. (in Russ.)
9. Morozova E.O., Ovchinnikov P.E., Semenova M.Ju. Nejrosетevaja obrabotka signalov monoimpul'snoj lokacii // Vestn. Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Radiofizika. 2013. № 6. S. 62–66. (in Russ.)

10. Zimina S.V. Statisticheskie harakteristiki iskusstvennoj nejronnoj seti s diskretnym gradientnym algoritmom nastrojki s uchetom fluktuacij vesovyh koeficientov // Nejrokomp'jutery: razrabotka i primenenie. 2006. № 10. S. 9–15. (in Russ.)
11. Zimina S.V. Vlijanie fluktuacij vesovyh koeficientov na statisticheskie harakteristiki iskusstvennoj nejronnoj seti s algoritmom rekurrentnogo obrashhenija vyborochnoj ocenki korreljacionnoj matricy vyhodnyh signalov // Nejrokomp'jutery: razrabotka i primenenie. 2007. № 5. S. 3–7. (in Russ.)
12. Karpuhin V.I., Kozlov S.V., Sergeev V.I. Pelengacionnye i fluktuacionnye harakteristiki amplitudnyh summarno-raznostnyh izmeritelej uglovyh koordinat s prostranstvennoj kompensaciej pomeh // Antenny. 2010. № 4. S. 59–66. (in Russ.)

Сведения об авторах

Козлов С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kozlov S.V., D.Sci, associate professor, professor of information radioengineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-11;
e-mail: korvin92@bk.ru
Козлов Сергей Вячеславович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-89-11;
e-mail: korvin92@bk.ru
Kozlov Sergei Vyacheslavovich