

# НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОНОИМПУЛЬСНОГО ПЕЛЕНГАТОРА НА БАЗЕ КВАДРАНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

С.В. Козлов, А.Д. Нехайчик

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), Минск, Беларусь

**Аннотация.** Рассматривается алгоритм пеленгации источника полезного сигнала в моноимпульсном пеленгаторе на базе квадрантной антенной решетки на основе нейронной сети с прямыми связями. Его отличительной особенностью 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.

## NEURAL NETWORK ALGORITHM SIGNAL PROCESSING MONOPULSE DIRECTION FINDER ON THE BASIS OF THE QUADRANT OF THE ANTENNA ARRAYS

S.V. Kozlov, A.D. Nechaichik

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

**Abstract.** The algorithm of direction finding of a useful signal source in a monoimpulse direction finder based on a quadrant antenna array based on a neural network with direct connections is considered. Its distinctive feature is the use of modules and phases of elements of the normalized upper-triangular correlation matrix of processes at the outputs of 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.

### 1. 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 и скатам главного лепестка диаграмм направленности основных каналов пеленгатора [1, 2 и др.], и алгоритмы, реализующих современные методы «сверхразрешения» источников радиоизлучения [3, 4 и др.]. 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) 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 диаграмм направленности 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 [6-8]. В работе [9] рассмотрен нейросетевой подход к обработке сигналов моноимпульсной локации, базирующийся на аппроксимации с использованием многослойного перцептрона пространственного распределения мощности источников радиоизлучения. Входными данными нейронной сети (НС) являлись измеренные мощности сигналов всех каналов антенной системы. Ограничения НС [9] связаны с использованием только амплитудной составляющей структуры сигналов, принимаемых элементами антенной системы, что существенно ограничивает возможности алгоритма в условиях интенсивных помех. В [10] нейронная сеть использована как универсальный аппроксиматор сигналов суммарного и разностного каналов моноимпульсной приемной системы. В работах [11-13] исследованы НС, настраивающиеся по дискретному градиентному алгоритму, алгоритму рекуррентного обращения выборочной корреляционной матрицы входных сигналов и алгоритму Хебба. 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 построения прямого, не аппроксимирующего известные статистические, нейросетевого алгоритма пеленгации полезных сигналов в моноимпульсном пеленгаторе на базе квадрантной антенной решетки в условиях интенсивных помех по боковым лепесткам ДН приемных каналов.

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

## **2. 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 диаграммами направленности (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

$$\dot{Y}_i = \dot{F}_i(\alpha_c, \beta_c)\dot{Y}_c + \dot{F}_i(\alpha_p, \beta_p)\dot{Y}_п + \dot{Y}_{sh_i}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{c(p)}, \beta_{c(p)}$  - 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;  $\dot{Y}_{sh_i}$  - отсчеты шумов приемных каналов;  $k$  - номер отсчета.

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

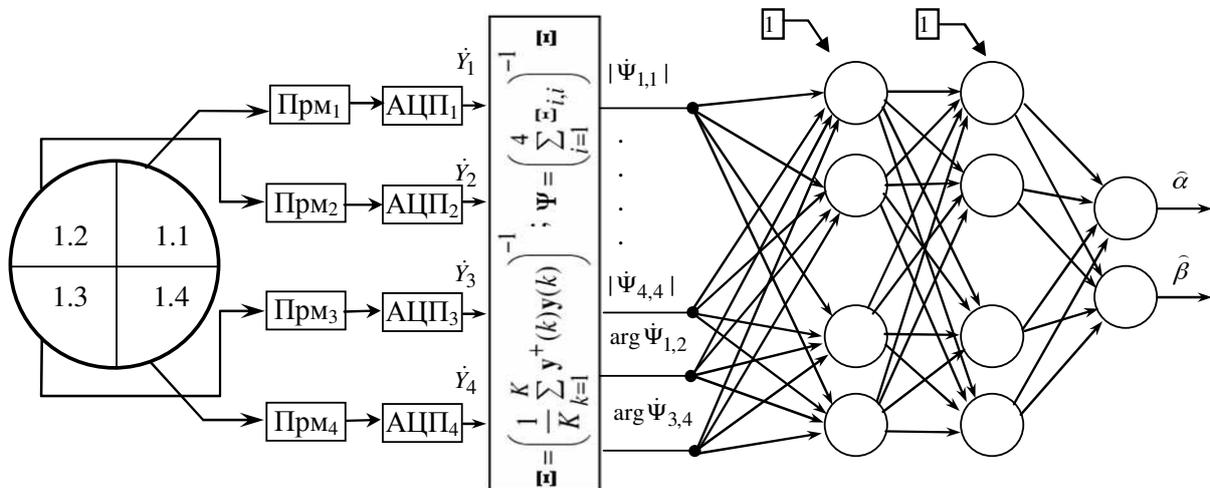


Рис. 1 – Структуры приемной системы и нейронной сети для оценки азимута и угла места источника полезного сигнала

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 дБ превышать мощность сигнальной составляющей. Это существенно затрудняет нормирование входных сигналов и, как следствие, возможность обучения

искусственной нейронной сети.

С учетом указанных обстоятельств в качестве основы для формирования вектора входных сигналов НА используем оценку  $\Xi$  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 и др.]. При этом использование обратной матрицы  $\Xi$  в сравнении с  $\hat{\Phi}$  более предпочтительно для построения НА, так как разброс ее значений ее элементов, особенно при большой мощности воздействующих по боковым лепесткам ДН приемных каналов помех оказывается существенно больше.

Матрица  $\Xi$  - 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  $\Psi$  удовлетворяют условию  $\dot{\Psi}_{i,j} = \Psi_{j,i}^*$ , следовательно, достаточно использовать матрицу  $\Psi$  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  $[0; 1]$ ):

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

десяти элементов матрицы  $\Psi$  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 рисунке 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  $\ell$ -го предъявляемого образца.

### 3. 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  $-3^\circ$  до  $3^\circ$  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  $\alpha(\beta)_p^{\min}$  до  $\alpha(\beta)_p^{\max}$

с шагом  $\delta\alpha(\beta)_p$  для мощности источника помехи  $P_p = 30; 40; 50$  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 рисунке 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  $\alpha_p^{\min} = 20^\circ, \alpha_p^{\max} = 22^\circ, \beta_p^{\min} = 15^\circ, \delta\alpha(\beta)_p = 0,5^\circ, \beta_p^{\max} = 17^\circ$ . 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.

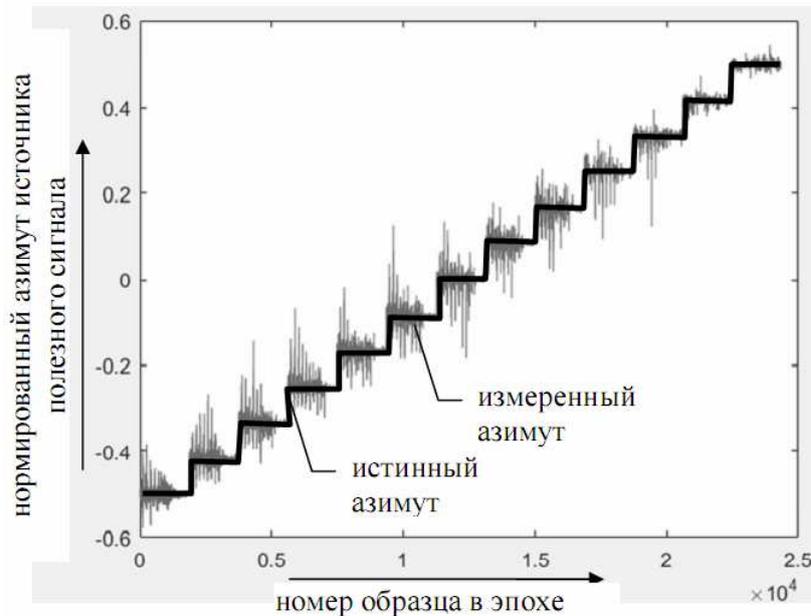


Рис. 2 – Результаты обучения нейронной сети

На рисунке 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  $\beta_c = -1,25^\circ, \alpha_p = 20,25^\circ, \beta_p = 15,25^\circ$  (все параметры не использовались в обучающей выборке) при  $P_c = 0,1$  для различных значений мощности помехи в пределах  $P_p = 20 \dots 70$  дБ.

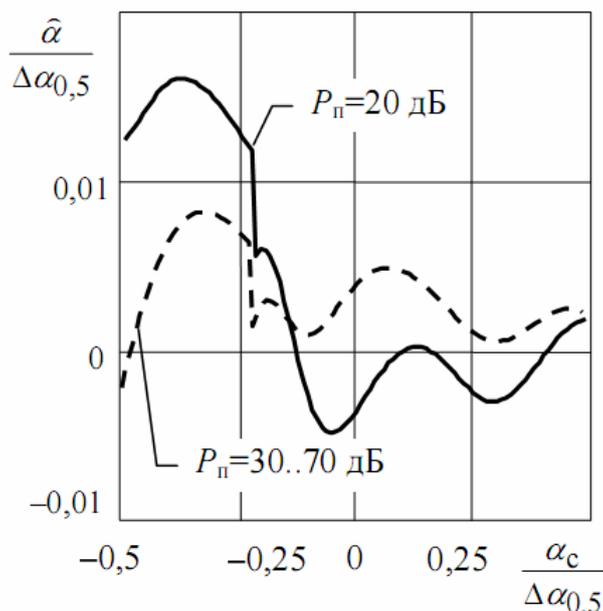


Рис. 3 – Зависимость ошибки пеленгации от азимута источника полезного сигнала для различных значений мощности источника помех

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  $5...10$  дБ. В частности, когда  $P_p = 20$  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  $\delta\alpha(\beta)_p / \Delta\alpha_{0,5} \approx 0,25$ . 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. Это обеспечения запоминания нейронной сетью расширенного набора исходных данных требуется адекватное увеличение числа нейронов в скрытых слоях.

Наряду с использованием обратной  $\Xi$  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 нейросетевом алгоритме и известном статистическом алгоритме [5] для аналогичных условий функционирования оказываются сравнимыми и составляют 2...3% от ширины главного лепестка ДН приемных каналов.

#### 4. 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. Рациональным является использование в качестве входной информации нормированных элементов оценки обратной корреляционной матрицы процессов на выходе приемных каналов в верхнетреугольном представлении. Полученные результаты могут быть естественным образом распространены на пеленгаторы с многоканальными антенными системами, в том числе, при реализации сверхразрешения источников радиоизлучения в пределах главного лепестка ДН. Значительный практический интерес представляет также комбинирование нейросетевых и статистических алгоритмов обработки, когда выходная информация об угловых координатах источника полезного сигнала, полученная от нейросетевого алгоритма, в условиях дефицита приемных каналов используется для адаптации статистического алгоритма выделения полезного сигнала на фоне помех.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки. 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. Сверхрешение: преодоление фактора некорректности обратной задачи рассеяния и проекционная радиолокация (т. 2). 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. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.
7. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника, 2009. – 432 с.
8. Нейрокомпьютеры в системах обработки сигналов / Под ред. Ю.В. Гуляева и А.И. Галушкина. М.: Радиотехника, 2003. – 344 с.
9. Гаврилов К.Ю., Богословская М.А. Применение нейронных сетей в задачах пеленгации радиолокационных целей // Информационно-аналитический журнал «Фазотрон», 2007, № 3-4.
10. Морозова Е.О, Овчинников П.Е., Семенова М.Ю. Нейросетевая обработка сигналов моноимпульсной локации // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика, 2013, № 6. – С. 62-66.
11. 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.

12. Зими́на 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.
13. Литви́нов О.С., Зими́на С.В. Статистический анализ флуктуаций весовых коэффициентов искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму Хебба // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*, 2009, № 3. – С. 33-43.
14. Карпу́хин В.И., Козлов С.В., Серге́ев 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. W.. Adaptive antenna arrays. M.: Radio and communication, 1986. – 448 p.
2. Karpukhin I. V., Kozlov S. V., Sergeev V. I. The Synthesis of the structure variants of angle coordinate radar meter with adaptive spatial jamming compensation // *Antennas*, 2010, No. 6. – P. 71-76.
3. Ratynsky M. V. Adaptation and super-resolution in antenna arrays. M.: Radio and communication, 2003. - 200 p.
4. Chizhov A.A. Super Rayleigh resolution. V. 2. Overcoming incorrectness factor of the inverse scattering problem, and projective radar detection. – M.: Krasand, 2010. – 104 p.
5. Kozlov, S. V., Sergeev, V. I., Semenyakin D. O. The Method of spatial jamming compensation in monopulse direction finder based of a quadrant antenna array // *Antennas*, 2017, No. 6. – P. 45-51.
6. Galushkin A. I. Neural network: basic theory. M.: Hot line-Telecom, 2010. – 496 p.
7. Tatusov A. L. Neural networks in tasks of radar. Moscow: Radio Engineering, 2009. – 432 p.
8. Neurocomputers in systems signal processing / edited by Yu. V. Gulyaev and A. I. Galushkin. Moscow: Radio Engineering, 2003. – 344 p.
9. Gavrilov K. Yu., Bogoslovskaya M. A. Application of neural networks in problems of direction finding of radar targets // *Information-analytical magazine "Fazotron"*, 2007, № 3-4.
10. Morozova E.O., Ovchinnikov P. E., Semenov M. Yu. Neural network processing of monopulse signals of the location // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. H. And. Lobachevsky. Radiophysics*, 2013, No. 6. – P. 62-66.
11. Zimina S. V. Statistical characteristics of artificial neural networks with discrete gradient algorithm settings based on the fluctuations of the weighting factors // *Neurocomputers: development and application*, 2006, No. 10. – P. 9-15.
12. Zimina S. V. Influence of fluctuations of the weighting factors on the statistical properties of artificial neural network algorithm recurrent treatment selective evaluation of the correlation matrix of the output signals // *Neurocomputers: development and application*, 2007, № 5. – P. 3-7.
13. Litvinov O. S., Zimina S. V. Statistical analysis of the fluctuations of the weighting coefficients of artificial neural network that could adapt according to the Hebb algorithm // *Neurocomputers: development and application*, 2009, No. 3. – P. 33-43.
14. Karpukhin V. I., Kozlov S. V., Sergeev V. I. Look direction and fluctuation's characteristics of the amplitude sum-and-difference meters of angle coordinates with spatial compensation // *Antennas*, 2010, № 4. – P. 59-66.