

ПЕЛЕНГАЦИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ МОЩНОЙ ПОМЕХИ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

С.В. Козлов, Ле Ван Кыонг

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

Аннотация. Применительно к задаче пеленгации источника полезного сигнала на фоне мощной помехи предложено применение ансамбля нейронных сетей (НС), ведущая из которых обучается для пеленгации мощной помехи, а ведомые – для пеленгации источника полезного сигнала в заданном секторе при различных фиксированных угловых положениях мощной помехи. Результирующая оценка формируется путем выбора результатов одной из ведомых НС по результатам оценивания углового положения источника помехи в ведущей. Приводятся результаты анализа точности пеленгации полезного сигнала и ориентировочного выигрыша в размерности НС и времени их обучения.

Ключевые слова: антенная решетка; корреляционная матрица; ансамбль нейронных сетей; пеленгатор; пространственная компенсация помех.

DIRECTION FINDING OF THE USEFUL SIGNAL ON THE BACKGROUND OF STRONG INTERFERENCE IN A MULTI-CHANNEL RECEIVING SYSTEM USING ENSEMBLE NEURAL NETWORKS

S.V. Kozlov, Le Van Cuong

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Abstract. As applied to the problem of useful signal source direction finding against the background of powerful interference, the application of neural network ensemble is proposed, the leading of which is trained for powerful interference direction finding, and the slaves – for useful signal source direction finding in a given sector at different fixed angular positions of powerful interference. The resulting assessment is formed by selecting the results of one of the slave neural network based on the results of the estimation of the angular position of the interference source in the host. The results of the analysis of the accuracy of the useful signal direction finding and the estimated gain in the dimension of the neural network and the time of their training are presented.

Keywords: antenna array; correlation matrix; ensemble of neural networks; direction finder; spatial noise compensation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача высокоточной пеленгации источников полезных сигналов является одной из основных в радиолокации, радиомониторинге и в некоторых радионавигационных приложениях. В значительном числе случаев пеленгация слабых полезных сигналов должна быть обеспечена на фоне внешних помех, мощность которых на десятки дБ превышает мощность полезного сигнала. Это предполагает реализацию комбинированных алгоритмов пространственной обработки с последующим оцениванием угловых координат источника полезного сигнала. Ввиду предельной

сложности как алгоритмов пространственной обработки, так и пеленгования растет интерес к применению для решения указанной задачи искусственных нейронных сетей [1-5].

В работе [6] предложен алгоритм пеленгации источника полезного сигнала в малоэлементном моноимпульсном пеленгаторе на базе квадрантной антенной решетки на основе многослойного персептрона. Отличительной особенностью алгоритма является использование в качестве входной информации модулей и фаз элементов нормированной обратной корреляционной матрицы (КМ) процессов на выходах приемных каналов. Алгоритм [6] обеспечивает качество пеленгации, сравнимое со статистическими оптимальными алгоритмами. К его основному недостатку относится необходимость увеличения числа нейронов в скрытых слоях при расширении области возможного нахождения источника мощной помехи с соответствующим увеличением времени обучения. Это обстоятельство существенно ограничивает возможность практического применения [6]. В работе [7] предложен двухэтапный алгоритм работы пеленгатора с применением искусственной нейронной сети, предполагающий последовательное определение сектора углов возможного нахождения источника единственного полезного сигнала с использованием НС первого уровня и точных оценок пеленга с использованием НС второго уровня.

Целью настоящей работы является развитие подхода [6] с учетом [7] в направлении обеспечения возможности его практической реализации для типовых условий функционирования пеленгационных систем.

2. ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА И СТРУКТУРЫ АНСАМБЛЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

При обосновании алгоритма ограничимся случаем наличия на входе пеленгатора в заданной полосе частот слабого полезного сигнала в заданном угловом секторе и единственной мощной помехи. Указанный случай охватывает значительное число пространственно-энергетических ситуаций в средствах радиомониторинга, навигации и радиолокации.

Основная идея построения предлагаемой процедуры во многом аналогична [7] и заключается в естественном разделении двух этапов:

на первом этапе оцениваются угловые координаты источника мощной помехи, при этом влиянием слабого полезного сигнала на результаты оценивания можно пренебречь;

на втором этапе для оцененного углового положения источника мощной помехи оцениваются угловые координаты полезного сигнала.

Возможные структуры ансамблей нейронных сетей приведена на рисунке 1. Там же приведены основные расчетные соотношения для формирования входных данных для ансамбля нейронных сетей. Входная НС-1 является ведущей и обучается для пеленгации мощной помехи. Формируемые оценки $(\hat{\alpha}_n, \hat{\beta}_n)$ угловых координат источника помехи используются для выбора результатов обработки входной реализации ведомыми НС-2.1... НС-2.N, где N – число возможных угловых положений помехи. Вся информация пространственно-энергетических характеристиках воздействующих

источников излучения «сжата» в выборочную корреляционную матрицу $\hat{\Phi}$ процессов на выходах приемных каналов. Матрица $\hat{\Phi}$ формируется из $k=\overline{1, K}$ отсчетов сигналов $\mathbf{y}(k) = (y_1(t_k), y_2(t_k), \dots, y_N(t_k))^T$ на выходах приемных каналов в моменты времени $t_k = k\Delta t$. Сформированная оценка регуляризуется путем прибавления к ней матрицы $\mu_p \mathbf{I}$, где μ_p - параметр регуляризации; \mathbf{I} - единичная матрица. Указанная операция регуляризации введена в дополнение к алгоритму [6] на основе известных закономерностей [8, 9], заключающихся в резком увеличении скорости сходимости статистически оптимальных алгоритмов пространственной обработки при использовании выборочных корреляционных матриц при числе отсчетов в выборке, менее и сравнимом с числом приемных каналов. Аналогичные закономерности, но только в части скорости обучения нейронной сети и требуемого числа нейронов в скрытых слоях, наблюдаются по результатам моделирования и для рассматриваемого случая.

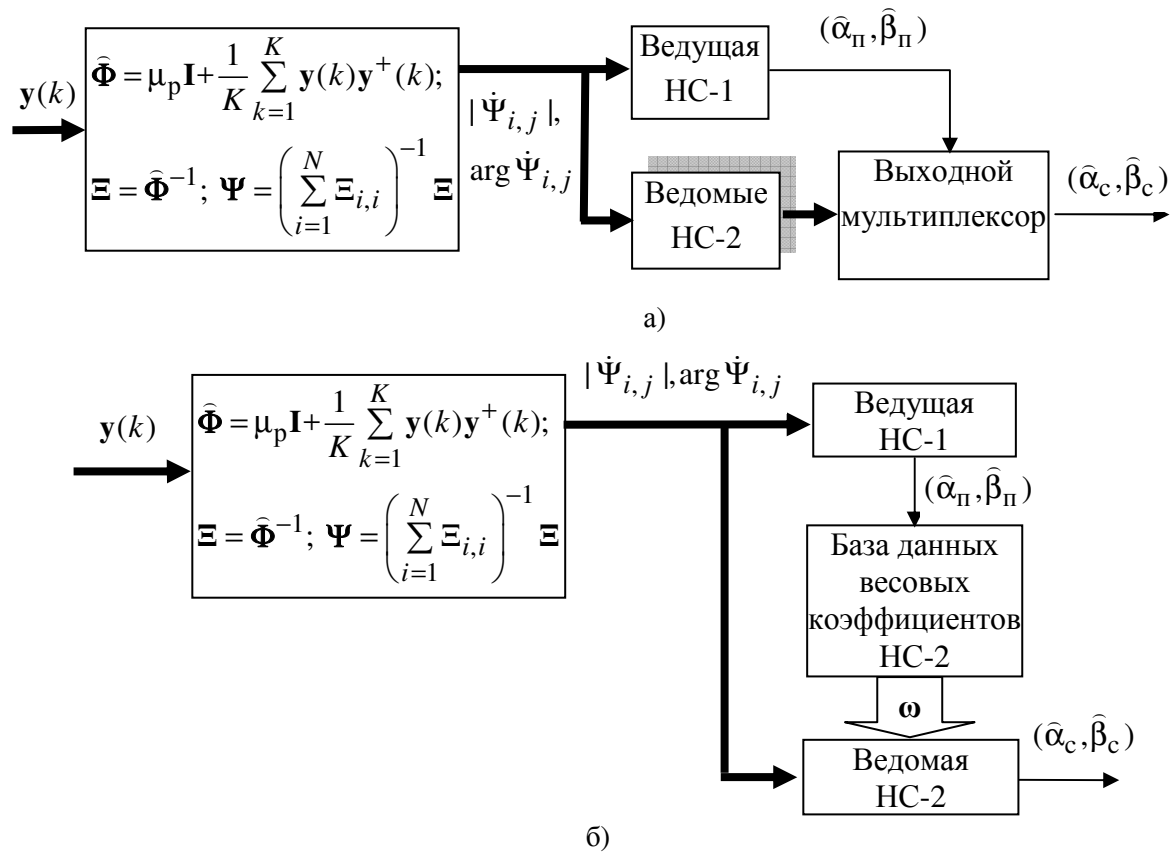


Рис 1. Структуры ансамблей НС для пеленгации

Далее, в соответствии с [6], регуляризованная КМ обращается, нормируется, выделяются модули и фазы ее элементов, которые и используются в качестве входной информации ансамбля НС.

В структуре на рисунке 1б используется одна ведомая НС-2, весовые коэффициенты которой загружаются из банка данных в соответствии с оценками угловых координат $(\hat{\alpha}_p, \hat{\beta}_p)$ источника мощной помехи.

Основным преимуществом применения предлагаемого ансамбля нейронных сетей в сравнении с единственной НС [6] является резкое сокращение требуемой размерности вводимых НС при обучении для одного фиксированного или нескольких соседних угловых положений источника помех.

В этой связи основным содержанием исследований по оптимизации структуры НС является определение минимально необходимой размерности НС-2 и их числа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для обучения одиночной НС и ансамбля НС использовался инструмент NNTool пакета MathLab. Входные сигналы НС формировались для антенной решетки, включающей 3 на 3 элемента с межэлементным расстоянием, равным половине длины волны. Элементы решетки принимались изотропными.

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 1° для нормированной (к мощности внутренних шумов приемных каналов) мощности источника полезного сигнала на выходе изотропной приемной антенны $P_c = 1; 10; 100$ и последовательного перемещения углового положения источника помехи в сетке по азимуту и углу места от $\alpha(\beta)_\Pi^{\min}$ до $\alpha(\beta)_\Pi^{\max}$ с шагом $\delta\alpha(\beta)_\Pi$ для нормированной мощности источника помехи $P_\Pi = 30; 40; 50$ дБ. Для обучения использовался стандартный метод Левенберга-Марквардта при числе эпох обучения 100-200 (для ансамбля нейронных сетей) и 5000 (для одиночной НС). Полезный сигнал, помеха и внутренние шумы приемных каналов представляли собой независимые гауссовские случайные процессы. Число независимых отсчетов входного процесса при формировании выборочной КМ выбиралось в шесть раз больше, чем число приемных каналов. Параметр регуляризации составлял $\mu_p = 10\sigma_{\text{ш}}^2$, где $\sigma_{\text{ш}}^2$ - мощность внутренних шумов приемных каналов.

При проведении моделирования для исходной одиночной НС [6], имеющей по 24 нейрона в каждом из двух скрытых слоев, для случая $\alpha_\Pi^{\min} = 20^\circ$; $\beta_\Pi^{\min} = 15^\circ$; $\alpha_\Pi^{\max} = 24^\circ$; $\beta_\Pi^{\max} = 18^\circ$; $\delta\alpha(\beta)_\Pi = 1^\circ$ (всего 20 угловых положений источника помех) время обучения НС на современном персональном компьютере составило около 8 часов при среднеквадратической ошибке пеленгации по тестовой выборке с параметрами источника полезного сигнала и помехи (1000 значений) в пределах диапазона изменения соответствующих параметров в обучающей выборке, равной $0,34^\circ$. Попытки дальнейшего увеличения числа угловых положений источника помех при сохранении числа нейронов в скрытых слоях приводят к существенному увеличению ошибки обучения, которая не может быть скомпенсирована увеличением времени обучения. Аналогично, при увеличении числа нейронов в скрытых слоях резко, до нереализуемых на практике значений, увеличивается время обучения.

Таким образом, возможности практической реализации предложенной в [6] нейронной сети при пеленговании источника полезного сигнала на фоне мощной помехи ограничены случаем, когда угловая область возможного нахождения источника помехи относительно невелика.

При использовании ансамбля нейронных сетей обучение НС-1 проводилось для случая использования в каждом из двух скрытых слоев НС-1 по 12 нейронов, а в каждом из двух скрытых слоев НС-1 по 3, 5 и 8 нейронов. Обучение каждой из НС-2 проводилось для случая нахождения источника помехи в угловой области размером $1^\circ \times 1^\circ$ при четырех положения источника помех в указанной области. Таким образом, для перекрытия, например, области возможного нахождения источника помех $30^\circ \times 30^\circ$ потребуется 900 обученных ведомых НС-2.

На рисунке 2 приведены результаты работы обученного ансамбля НС (по 5 нейронов в скрытых слоях ведомых НС) при пеленговании источника полезного сигнала. Угловые положения азимута α_c источника полезного сигнала изменялись в пределах $-3^\circ \dots 3^\circ$ (20 значений, пунктирная кривая). Число обученных для иллюстрации результатов НС-2 составило 30 (угловой сектор нахождения помехи $10^\circ \times 3^\circ$). Соответствующим маркерами на рисунке 2 показаны оценки $\hat{\alpha}_c$ азимута полезного сигнала, формируемые ансамблем НС для двух угловых положений источника помехи, выбранных в пределах диапазона изменения угловых положений источника помех при обучении, но несовпадающих с ними. Оценки $(\hat{\alpha}_\Pi, \hat{\beta}_\Pi)$ угловых координат источника помех, формируемые НС-1, во всех случаях приводили к правильному выбору ведомой НС-2. Результаты пеленгации в угломестной плоскости аналогичны.

Достаточное число эпох обучения ведомых НС-2 составило 100 при времени обучения около 1 минуты.

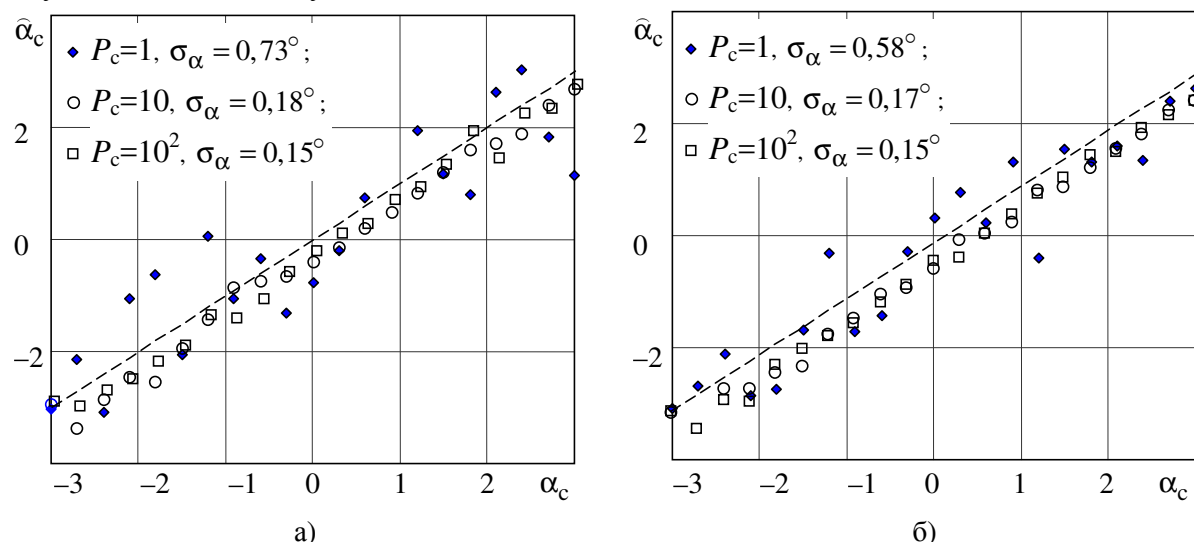


Рис 2. Оценки углового положения полезного сигнала, формируемые ансамблем НС для двух (а,б) различных угловых положений источника помехи

При увеличении числа нейронов в скрытых слоях ведомых НС до 8 ошибка пеленгации уменьшается примерно на 30%. В то же время, при уменьшении числа

нейронов в скрытых слоях до 3 ошибка пеленгации увеличивалась не более чем на 20%, то есть за счет выбора числа нейронов в скрытых слоях может быть достигнут определенный компромисс между аппаратурными затратами и точностью пеленгации.

С учетом относительно большого числа ведомых НС-2 предпочтительным является вариант реализации ансамбля НС в соответствии со структурной схемой на рис. 1б, предполагающей использование базы данных весовых коэффициентов ведомых НС-2 и выбор требуемых наборов весовых коэффициентов в соответствии с получаемыми от НС-1 оценками угловых координат источника мощной помехи.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтверждают возможность построения двухэтапного нейросетевого алгоритма пеленгации полезного сигнала на фоне мощной помехи без ограничений на угловые размеры области возможного нахождения источника помехи и могут быть использованы, например, при построении малоэлементных пеленгаторов средств радиомониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейрокомпьютеры в системах обработки сигналов / Под ред. Ю.В. Гуляева и А.И. Галушкина. М.: Радиотехника, 2003. – 344 с.
2. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника, 2009. – 432 с.
3. Гаврилов К.Ю., Богословская М.А. Применение нейронных сетей в задачах пеленгации радиолокационных целей // Информационно-аналитический журнал «Фазотрон», 2007, № 3-4.
4. 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.
5. Шевгунов Т.Я., Ефимов Е.Н., Филимонова Д.В., Воскресенский Д.И. Оценка направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей максимального правдоподобия // Цифровая обработка сигналов, 2017, № 2. – С. 59-64.
6. Козлов С. В. Обработка сигналов малоэлементного моноимпульсного пеленгатора в условиях мощных помех с использованием искусственных нейронных сетей // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018, № 5. – С. 31-37.
7. Аверьянов А.В., Строцев А.А. Двухэтапный алгоритм работы пеленгатора с применением искусственной нейронной сети // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018, т. 4, № 1. – С. 185-190.
8. Абрамович Ю.И. Регуляризованный метод адаптивной оптимизации фильтров по критерию максимума отношения сигнал/помеха // Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 3. – С. 543-551.
9. Абрамович Ю.И., Качур В.Г., Михайлюков В.Г. Сходимость коэффициента направленного действия и его стабилизация в быстродействующих процедурах адаптивной настройки пространственных фильтров // Радиотехника и электроника, 1981 т. 34, № 2. – С. 1438-1446.

REFERENCES

1. Neurocomputers in signal processing systems / Ed. Yu.V. Gulyaev and A.I. Galushkina. M.: Radio Engineering, 2003. - 344 p.
2. Tatoov A.L. Neural networks in radar tasks. M.: Radio engineering, 2009. - 432 p.
3. Gavrilov K.Yu., Bogoslovskaya MA The use of neural networks in tasks of finding radar targets // Information and analytical magazine "Phazotron", 2007, № 3-4.

4. Morozova E.O., Ovchinnikov P.E., Semenova M.Yu. Neural network signal processing of single-pulse location // Bulletin of Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Radiofizika, 2013, № 6. - p. 62-66.
5. Shevgunov T.Ya., Efimov E.N., Filimonova D.V., Voskresensky D.I. Evaluating the direction of signal arrival using maximum-likelihood artificial neural networks // Digital Signal Processing, 2017, No. 2. - P. 59-64.
6. Kozlov SV. Signal processing of a low-element monopulse direction finder under conditions of powerful interference using artificial neural networks // Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 2018, No. 5. - P. 31-37.
7. Averyanov A.V., Strocev A.A. A two-stage algorithm for the operation of the direction finder using an artificial neural network // DSPA: Issues of application of digital signal processing. 2018, vol. 4, no. 1. - p. 185-190.
8. Abramovich Yu.I. The regularized method of adaptive filter optimization according to the maximum signal-to-noise ratio // Radio Engineering and Electronics, 1981, Vol. 26, No. 3. - P. 543-551.
9. Abramovich Yu.I., Kachur V.G., Mikhailyuk V.G. Convergence of the directional coefficient and its stabilization in high-speed procedures for adaptive adjustment of spatial filters // Radio Engineering and Electronics, 1981 t. 34, No. 2. - P. 1438-1446.