

УДК 004.8, 004.94, 51-74, 621.37, 621.396.969.1

Формирование оценки направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей

Ефимов Е.Н.*, Шевгунов Т.Я.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: omegatype@gmail.com*

***e-mail: shevgunov@mai-trt.ru*

Аннотация

В работе рассмотрено применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для решения задачи формирования оценки направления прихода сигнала в пассивных системах радиолокации. Оптимальным методом решения данной задачи является построение оценки по методу максимального правдоподобия, состоящее в максимизации целевой функции, зависящей от направления прихода и данных, вычисленных на основе принятых сигналов. Оптимальный метод обладает высокой точностью получаемой оценки, однако её выражение не имеет явной алгебраической формы, поскольку оценка достигается путём проведения численной оптимизации, реализация которой требует больших вычислительных затрат. В данной работе предлагается альтернативное решение, основанное на применении ИНС типа многослойный персептрон со специальным оконечным нейроном. Такая сеть после своего обучения, проводимого по детерминированной схеме на основе

модельных данных, позволяет значительно снизить требуемую вычислительную мощность за счет допустимого снижения точности получаемой оценки.

Ключевые слова: нейронные сети, многослойный персептрон, математические методы моделирования, радиопеленгация, радиолокация, метод максимального правдоподобия, граница Крамера-Рао.

1. Введение

В данной работе рассматривается решение задачи оценки направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей в пассивной системе радиолокации. На рис. 1 показана структурная схема, иллюстрирующая данную проблему: источник излучения (ИИ) излучает сигнал, принимаемый радарной системой. Частная задача оценки направления прихода сигнала состоит в определении угла между направлением на ИИ и опорным направлением радарной системы.

Оптимальным методом решения поставленной задачи является построение оценки по методу максимального правдоподобия (ММП), состоящее в максимизации целевой функции, зависящей от пеленга и принятых данных [1]. Преимуществом этого метода является высокая точность, однако его реализация требует большой вычислительной мощности, необходимой при численном решении задачи оптимизации целевой функции [2].

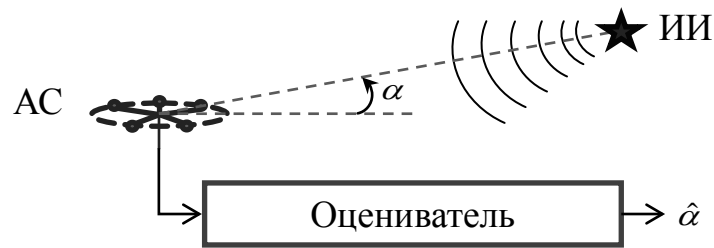


Рис 1: Структурная схема, иллюстрирующая рассматриваемую задачу.

В настоящей работе исследуется предложенный авторами метод формирования оценки на основе искусственных нейронных сетей типа многослойный персептрон, который позволяет значительно снизить требуемую вычислительную мощность за счет допустимого снижения точности; дано теоретическое описание предлагаемого метода и представлены результаты численного моделирования. В заключении приведено сравнение требуемой вычислительной мощности предложенного решения с требуемой вычислительной мощностью оптимального решения.

2. Модель приёма сигнала

Оценка направления прихода сигнала выполняется на основе обработки сигналов, принятых антенной системой (АС), входящей в состав радарной системы. В данной работе используется модель антенной системы, состоящей из K точек приёма (ТП), реализованных посредством всенаправленных антенных элементов. Координаты ТП известны с высокой точностью, а ИИ расположен на значительном удалении от АС, так что фронт падающей волны можно полагать плоским.

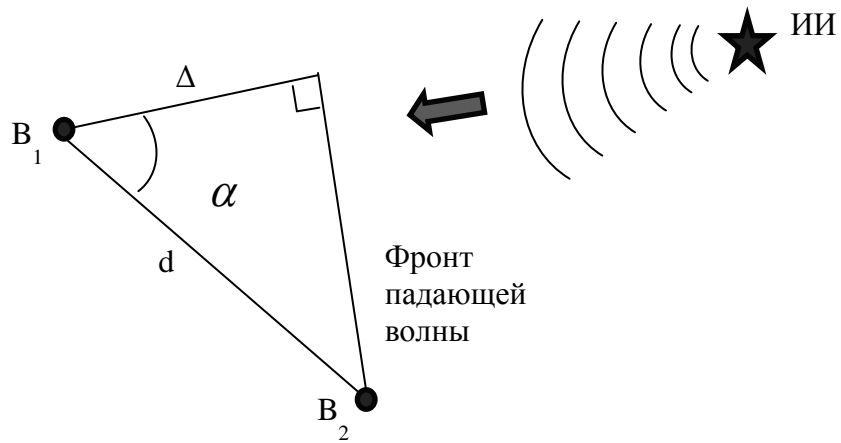


Рис. 2: Иллюстрация положения ТП АС относительно ИИ.

Точки приёма антенной системы, в общем случае, расположены на различном расстоянии до источника излучения. На рис. 2 показаны точки B_1 и B_2 антенной системы, между которыми имеет место разность хода Δr . Излучаемый источником сигнал наблюдается в ТП с различными задержками D_1 и D_2 , для оценки направления прихода сигнала используется разность задержек $D_2 - D_1$, оцениваемая через фазы принятых сигналов:

$$\begin{aligned} \Delta r &= d \cos(\alpha), \\ D_2 - D_1 &= \Delta r / c. \end{aligned} \quad (1)$$

Расстояние d между точками приёма выбирается исходя из условия однозначного измерения фазы:

$$d < \frac{c}{2f_0}. \quad (2)$$

Источник излучения излучает узкополосный радиосигнал $s(t)$ на несущей частоте f_0 в полосе Δf . Изучаемый сигнал является реализацией стационарного эргодического случайного процесса, который, как известно [1], может быть представлен в виде суммы гармоник:

$$s(t) = \sum_k (a_k \cos(2\pi(f_0 + f_k)t) + b_k \sin(2\pi(f_0 + f_k)t)), \quad (3)$$

где a_k и b_k – независимые гауссовские случайные величины с нулевыми средними.

Корреляционная функция $R_s(\tau)$ случайного процесса полагается известной:

$$R_s(\tau) = E\{s(t)s(t-\tau)\}. \quad (4)$$

Таким образом, в некоторой точке приёма антенной системы наблюдаемый сигнал $x(t)$ имеет вид:

$$x(t) = a \cdot s(t-D) + \xi_t(t), \quad (5)$$

где a – амплитудный множитель, D – величина задержки, $\xi_t(t)$ – шум измерений.

Полагается, что шум измерений не коррелирован с сигналом, а также то, что шумы в различных ТП АС не коррелированы между собой. За период наблюдения T сигнал в i -ой точке приёма может быть представлен вектором \mathbf{X}_i , состоящим из $N = T\Delta f$ коэффициентов ряда Фурье:

$$\mathbf{X}_i[n] = aS[n] \exp^{-j2\pi D_i n/(NT)} + \xi_{f,i}[n], \quad (6)$$

где S – спектр излученного сигнала, $\xi_{f,i}$ – спектр шума измерений в i -ой точке приёма. Для каждого индекса n имеет место быть нулевое среднее и корреляционная матрица \mathbf{Q}_n , состоящая из элементов $q_{n;i,j}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_n &= E\left\{[\mathbf{X}_0[n], \mathbf{X}_1[n] \cdots \mathbf{X}_K[n]] \cdot [\mathbf{X}_0[n], \mathbf{X}_1[n] \cdots \mathbf{X}_K[n]]^H\right\}, \\ q_{n;i,j} &= a^2 P_{s;n} \exp^{-j2\pi n/(NT)(D_j - D_i)} + P_{\xi;n;i,j}, \\ P_{\xi;n;i,j} &= 0, i \neq j, \end{aligned} \quad (7)$$

где $P_{s;n}$ – мощность излученного сигнала на частоте $n/(NT)$, $P_{\xi;n;i,j}$ – спектральная плотность мощности (СПМ) шума измерений на частоте на частоте $n/(NT)$ в точках приёма i и j соответственно. Важно отметить, что корреляционные матрицы

принятого сигнала \mathbf{Q}_n не содержат в себе зависимости от случайной начальной фазы изученного сигнала. После усреднения по n от 1 до N составляется матрица Φ :

$$\underbrace{\Phi}_{K \times K} = 2\pi f_0 \begin{pmatrix} 0 & D_1 - D_2 & \cdots & D_1 - D_{K-1} & D_1 - D_K \\ D_2 - D_1 & 0 & * & D_2 - D_{K-1} & D_2 - D_K \\ \vdots & * & \ddots & * & * \\ D_{K-1} - D_1 & * & * & * & D_{K-1} - D_K \\ D_K - D_1 & D_K - D_2 & * & D_K - D_{K-1} & 0 \end{pmatrix} + \xi, \quad (8)$$

где ξ – матрица шумовых коэффициентов. Элементы, лежащие выше главной диагонали матрицы Φ , представляют собой попарные разницы в задержке приёма излученного сигнала в точках приёма АС.

3. Оптимальное решение

Оптимальное решение рассматриваемой задачи основывается на максимизации логарифма функции правдоподобия в частотной области относительно оцениваемого параметра α – угла между ИИ и опорным направлением антенной системы. Для частоты f_m логарифм функции правдоподобия имеет вид:

$$L(\alpha) = L_0(|\mathbf{X}_{*,m}|, \mathbf{P}_\xi) - L_1(|\mathbf{X}_{*,m}|, \mathbf{P}_\xi, a, P_s) - L_2(\alpha, \mathbf{X}_{*,m}, \mathbf{P}_\xi, a, P_s), \quad (9)$$

где L – логарифм функции правдоподобия, $\mathbf{X}_{*,m}$ – вектор комплексных амплитуд гармоник частоты $f_0 + f_m$, \mathbf{P}_ξ – СПМ шума в точках приёма, P_s – СПМ излученного ИИ сигнала, a – амплитудный множитель. L_0, L_1, L_2 - сложные нелинейные функции. Фактический интерес представляет функция L_2 , зависящая от угла α :

$$L_2 = \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{k=i+1}^K V_{i,k} \cos(2\pi f_m D_i - 2\pi f_m D_k + \varphi_{i,k}), \quad (10)$$

где параметры $V_{i,k}$ и $\varphi_{i,k}$ определяются по формулам:

$$\varphi_{i,k} = -\arg(\mathbf{X}_{i,m}) + \arg(\mathbf{X}_{k,m}),$$

$$V_{i,k} = \frac{2|\mathbf{X}_{i,m}||\mathbf{X}_{k,m}|}{\mathbf{P}_{\xi,i}\mathbf{P}_{\xi,k} \left\{ \frac{1}{a^2 P_s} + \text{tr}(\mathbf{P}_{\xi}^{-1}) \right\}}.$$

В простейшем случае максимизация L сводится к минимизации L_2 численным методом. Максимизация функции правдоподобия выполняется для всех частот сигнала. Оптимальный метод обладает наибольшей точностью, однако в виду нелинейного и сложного характера функции L_2 максимизация выполняется численными методами, что требует значительных вычислительных ресурсов.

В настоящей работе предложено решение, основывающееся на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющее значительно снизить требуемые вычислительные ресурсы за счет допустимого снижения точности.

4. Формирование нейросетевой оценки

Предложенное решение заключается в синтезе ИНС специальной структуры (рис. 3). ИНС – математические модели [3], построенные по принципам, заимствованным из биологических нейронных сетей.

В данном случае ИНС можно рассматривать в качестве системы, выполняющей некоторое преобразование над вектором входных данных:

$$\hat{\alpha} = Z(\Theta)(\mathbf{P}) \quad (11)$$

где Z – функциональное преобразование, реализуемое нейронной сетью, Θ – параметры нейронной сети. Вектор \mathbf{P} представляет собой вектор входных данных, сформированный на основе спектров сигналов, принимаемых в точках приёма:

$$\mathbf{P} = M(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K), \quad (12)$$

где M –преобразование, выполняемое по известному алгоритму, \mathbf{X}_i – вектор коэффициентов ряда Фурье сигнала, принятого в i -ой точке приема антенной системы.

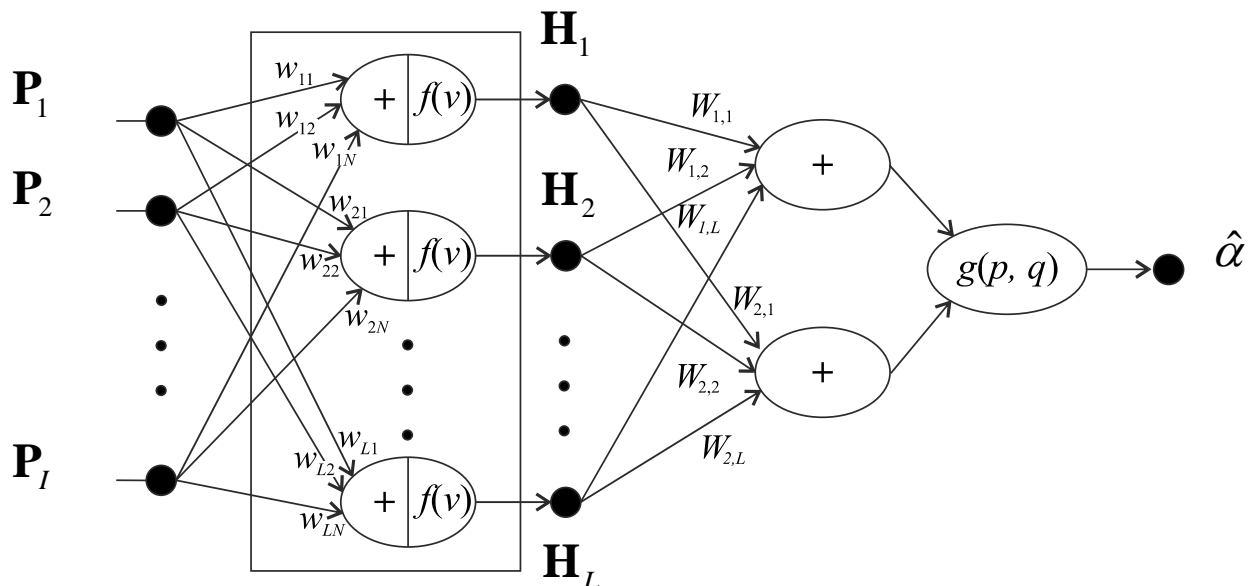


Рис. 3: Структурная схема предложенной нейронной сети, где \mathbf{W} – матрица весовых коэффициентов адаптивных усилителей, f, g – функции активации нейронов, \mathbf{H} – вектор сигналов, протекающих в скрытом слое сети.

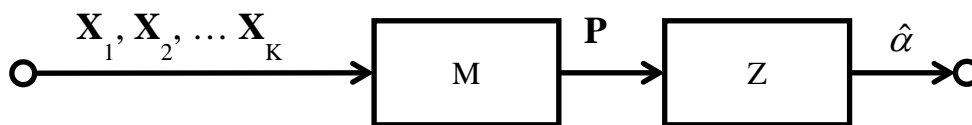


Рис. 4: Формирование оценки направления прихода сигнала на основе спектров сигналов, наблюдаемых в ТП АС.

Система формирования оценки для направления прихода сигнала на основе спектров сигналов в ТП АС принимает вид, представленный на рис. 4.

Функциональное преобразование M заключается в получении вектора входных данных для нейронной сети из выборочных оценок корреляционных матриц \mathbf{Q}_n :

$$\hat{\mathbf{Q}}_n = [\mathbf{X}_0[n], \mathbf{X}_1[n] \cdots \mathbf{X}_K[n]] \cdot [\mathbf{X}_0[n], \mathbf{X}_1[n] \cdots \mathbf{X}_K[n]]^H, \quad (13)$$

или, точнее, на основе оценки матрицы Φ :

$$\underbrace{\hat{\Phi}}_{K \times K} = 2\pi f_0 \begin{pmatrix} 0 & \Delta\hat{D}_{1,2} & \cdots & \Delta\hat{D}_{1,K-1} & \Delta\hat{D}_{1,K} \\ \Delta\hat{D}_{2,1} & 0 & * & \Delta\hat{D}_{2,K-1} & \Delta\hat{D}_{2,K} \\ \vdots & * & \ddots & * & * \\ \Delta\hat{D}_{K-1,1} & * & * & * & \Delta\hat{D}_{K-1,K} \\ \Delta\hat{D}_{K,1} & \Delta\hat{D}_{K,2} & * & \Delta\hat{D}_{K,K-1} & 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где $\Delta\hat{D}_{i,j}$ – оценка задержки прихода сигнала между i -ой и j -ой точкой приёма АС.

Входной вектор данных \mathbf{P} составляется из элементов лежащих выше главной диагонали, поскольку именно они содержат информацию об оцениваемых параметрах.

Форма преобразования входных данных \mathbf{P} в выходное значение оценки параметра пеленга α не имеет явного аналитического представления. Ключевой особенностью ИНС является возможность создания функционального преобразования требуемой сложности посредством итеративной процедуры, известной как обучение. Процесс обучения представляет собой определение вектора параметров Θ сети при заданной топологии по известному множеству эталонных пар входных векторов и соответствующих им выходных векторов, называемыми шаблонами обучения:

$$\left[(P_0, \hat{\alpha}_0), (P_1, \hat{\alpha}_1) \cdots (P_{N_p}, \hat{\alpha}_{N_p}) \right], \quad (15)$$

где N_p – количество шаблонов обучения. Усложняя топологию сети и увеличивая количество шаблонов обучения, на основании теоремы Колмогорова [4] можно утверждать, что функция преобразования, выполняемая сетью, будет сходиться к

требуемой функции. Таким образом, обученная нейронная сеть способна выполнять с некоторой точностью неизвестное функциональное преобразование.

Процесс обучения рассматривается как процесс минимизации среднеквадратической ошибки (СКО), в литературе [5, 6] показано, что для скалярного параметра максимизация функции правдоподобия L_2 достигается путём минимизации среднеквадратической ошибки (СКО):

$$E = \frac{1}{N_p} \sqrt{\sum_i (\hat{\alpha}_i - \alpha_i)^2},$$

$$\min(E) \rightarrow \max(L_2). \quad (16)$$

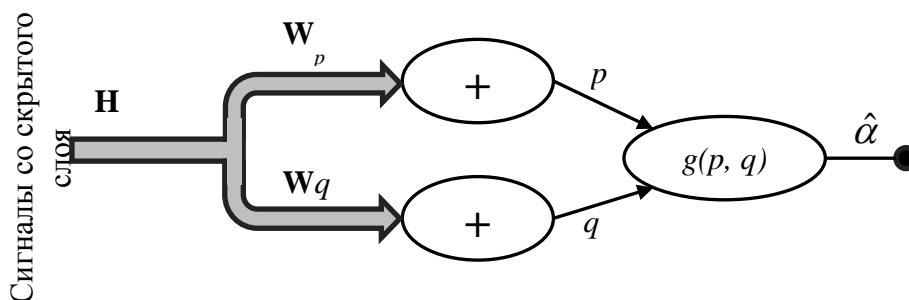


Рис. 5: Структурная схема нейрона выходного слоя.

Структура (топология) нейронной сети предложена в соответствии со структурой модели, используемой в решаемой задаче. Нейрон выходного слоя, структурная схема которого показана на рис. 5, реализован алгоритмически в парадигме адаптивных элементов [7, 8] со следующими функциями прямого и обратного распространения сигналов:

$$\hat{\alpha} = \arg(p + jq),$$

$$[p_b, q_b] = \left[\frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial p}, \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial q} \right], \quad (17)$$

где p и q – сигналы, поступающие на вход нейрона при прямом прохождении сигналов через сеть, p_b и q_b – сигналы, распространяющиеся через нейрон в процессе обратного распространения сигнала ошибки.

5. Результаты численного моделирования

Для оценки эффективности предложенного в работе решения было проведено численное моделирование со следующими параметрами: скорость распространения сигнала $c = 3 \times 10^8$ м/с, несущая частота $f_0 = 50$ МГц, эффективная ширина спектра $\Delta f = 32$ кГц, время наблюдения сигнала $T = 1$ мс, принимаемая мощность сигнала $P_s = 1$ мкВт. Синтезированная ИНС была обучена по методу обучения второго порядка [9], основанному на алгоритме Левенберга-Марквардта [10, 11]. После завершения обучения выполнен анализ точности оценки пеленга, получаемой при помощи ИНС. В качестве антенной системы использована кольцевая антенная система (рис. 6), состоящая из 7 точек приема: по три точки расположены на двух концентрических кольцах, одна точка – в центре системы.

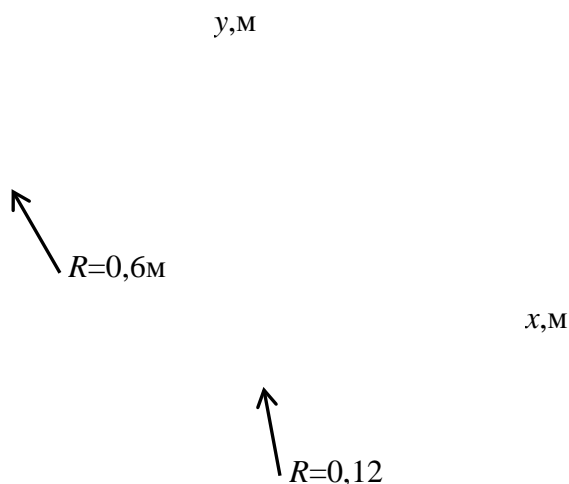


Рис. 6: Кольцевая антенная системы.

Для данной конфигурации антенной системы в работе [12] было получено аналитическое выражение для нижней границы Крамера-Рао:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{c\sqrt{1+Mq}}{\pi f_0 q \sqrt{8MM_r T \Delta f}}, \quad (18)$$
$$M = \sum_j M_j; M_r = \sum_j M_j r_j^2,$$

где q – отношение сигнал-шум; M_j – количество элементов в j -ом кольце, r_j – радиус j -ого кольца.

Нижняя граница Крамера-Рао ошибок оценки направления прихода сигнала для случая использования кольцевой антенной системы позволяет определить предельно достижимую точность в оценке направления прихода сигнала оптимальным методом максимального правдоподобия, кратко рассмотренным в разделе 3.

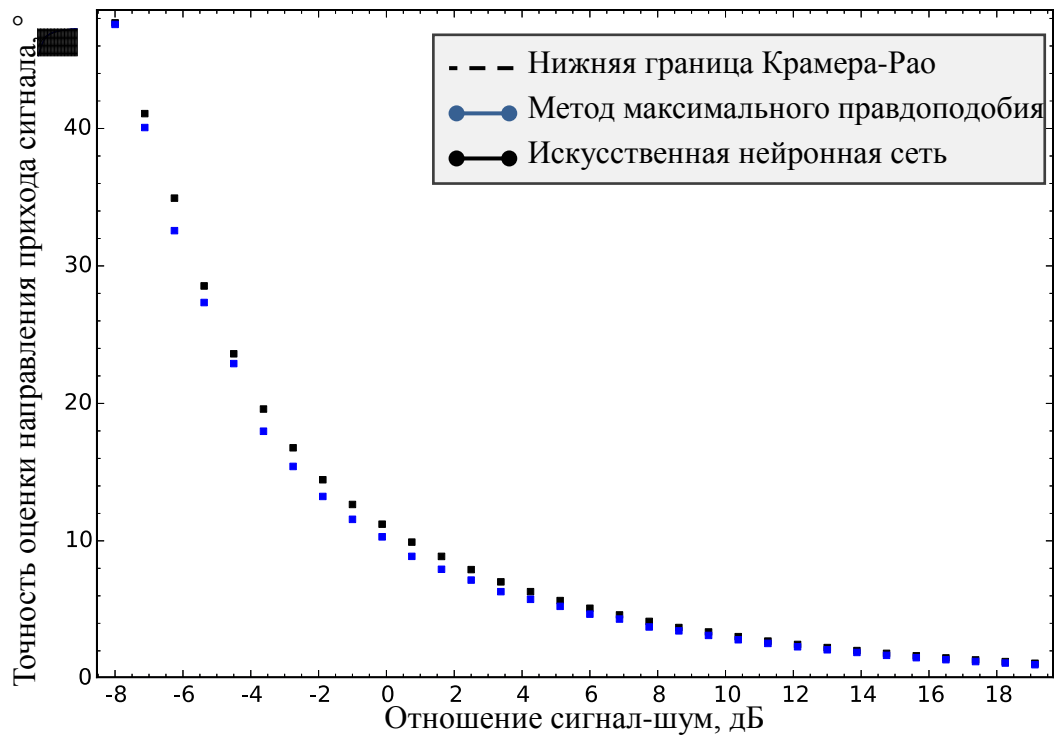


Рис. 7: Зависимость точности определения направления прихода сигнала от отношения сигнал-шум.

В результатах проведенного моделирования приводится сравнение предложенного метода, во-первых, с нижней границей Крамера-Рао, во-вторых, с методом максимального правдоподобия. Из графиков на рисунках 7 и 8 видно, что предложенный метод обладает меньшей точностью, чем метод максимального правдоподобия, обеспечивая увеличение СКО не более чем на 10% в диапазоне отношений сигнал-шум от -4 до 10 дБ.

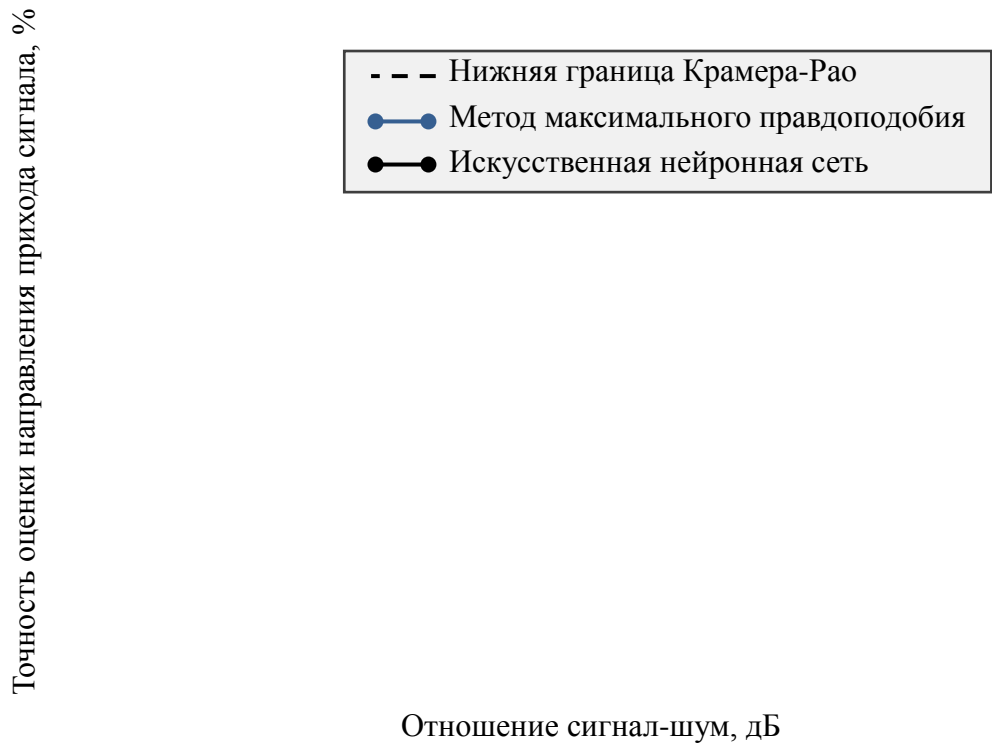


Рис. 8: Зависимость точности определения направления прихода сигнала от отношения сигнал-шум в процентном отношении к нижней границе Крамера-Рао.

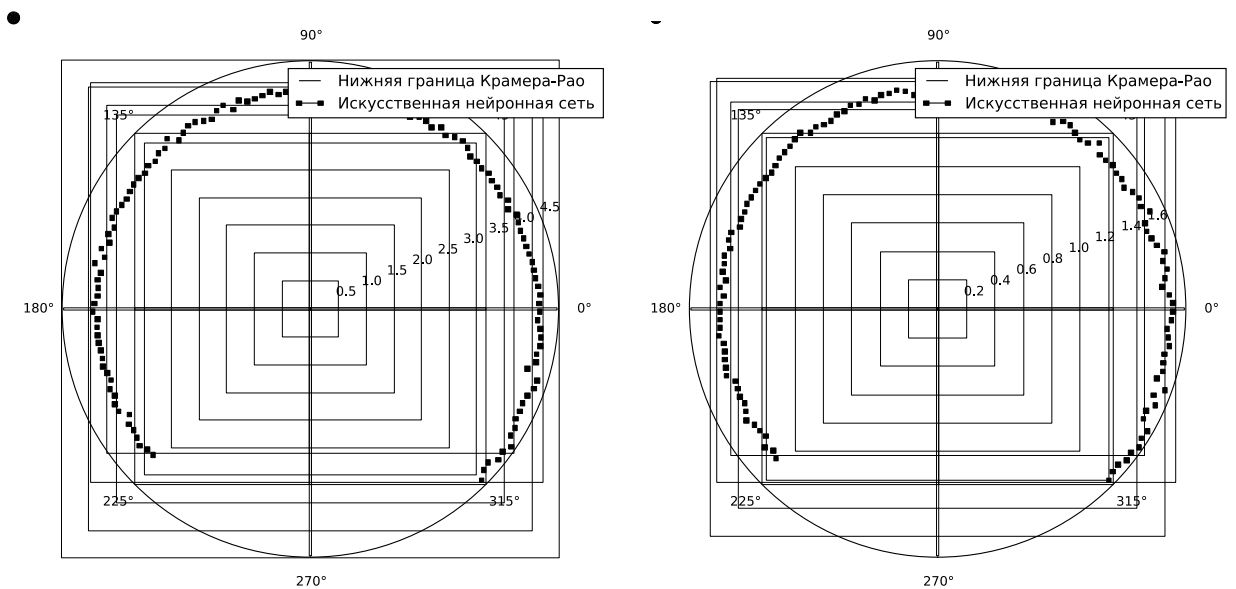


Рис. 9: Зависимость точности оценки направления прихода сигнала от истинного значения направления прихода сигнала для различных отношений сигнал-шум: 8 дБ (слева) и 10 дБ (справа).

Результаты численного моделирования так же показывают отсутствие значимой зависимости точности оценки направления прихода сигнала от истинного значения направления прихода сигнала (рис. 9). В таблице 1 приведено сравнение некоторых параметров предложенного метода с методом максимального правдоподобия.

Таблица 1 Сравнительная характеристика оптимального метода и метода на основе искусственной нейронной сети

Параметр		Искусственная нейронная сети	Метод максимального правдоподобия
Время, требуемое для определения пеленга		2,74 мс.	33,4 мс.
Зависимость времени, требуемого для определения пеленга от числовых значений		Отсутствует (количество вычислительных операций строго определено и не меняется)	Присутствует (количество вычислительных операций зависит от конкретной формы функции правдоподобия)
Время, затраченное на предварительную подготовку		Обучение – 1,32 мин.	Не требуется
Снижение точности по сравнению с нижней границей Крамера-Рао	-4 дБ	30 %	26 %
	0 дБ	13 %	4 %
	10 дБ	9 %	2 %

Заключение

В работе предложено решение задачи формирования оценки пеленга в пассивной радиолокационной системе при помощи искусственных нейронных

сетей. Предложенное решение позволило снизить требования к вычислительным ресурсам, требуемым при оценке параметра α на основе единичных измерений. Оценка при помощи ИНС требует в 12 раз меньше времени по сравнению с оценкой при помощи численного решения задачи максимизации функции правдоподобия. Снижение точности оценки не более чем на 10% в диапазоне отношений сигнал-шум от –8 дБ до 18 дБ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках
научного проекта № 14-01-31399 мол_а*

Библиографический список

1. Дубровин А.В., Сосулин Ю.Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радиоизлучения пассивной системой, состоящей из узкобазовых подсистем // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 2. С. 156–170.
2. Дубровин А.В., Сосулин Ю.Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радиоизлучения комбинированной пассивной системой // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 51. № 4. С. 441 – 457.
3. Samarasinghe S. Neural Networks for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Complex Pattern Recognition // Auerbach Publications, 2006, p. 570.
4. Хайкин С. Нейронные сети: Пер. с англ. - М: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. - 1104 с.

5. Setiono R. Feedforward Neural Network; Construction Algorithm; Maximum Likelihood Function; Quasi-newton Methods., Connection Science, №7:2, 1995.
6. Baum E. Supervised Learning of Probability Distributions by Neural Networks, American Institute of Physics, 1988.
7. Ефимов Е.Н., Шевгунов Т.Я. Построение нейронных сетей прямого распространения с использованием адаптивных элементов // Журнал радиоэлектроники. 2012, №8: <http://jre.cplire.ru/win/aug12/4/text.html>
8. Шевгунов Т.Я. Ефимов Е.Н. Разработка и исследование методики построения нейронных сетей на основе адаптивных элементов // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, № 51: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29159> (дата публикации 26.03.2012)
9. Battiti R. First- and Second-Order Methods for Learning: Between Steepest Descent and Newton's Method. Neural Computation, 1992, Vol. 4, № 2, Pp. 141 – 166.
10. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares, Q. Appl. Math., vol. 2, pp. 164–168, 1944.
11. Marquardt D. W. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters, J. Soc. Ind. Appl. Math., vol. 11, pp. 431–441, 1963.
12. Дубровин А. В. Потенциальная точность пеленгования комплексами с антенными решетками, имеющими конфигурацию в виде набора произвольного числа колец // Радиотехника и электроника. 2006. т. 51. №13. С. 268–270.