

УДК 621.396.677.51:004.8-047.37

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПЕЛЕНГАТОРА НА БАЗЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПОДРЕШЕТКАМИ И КОМБИНИРОВАННОЙ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

И.А. ДУБОВИК<sup>1</sup>, И.А. ЗАЙЦЕВ<sup>2</sup>, С.В. КОЗЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(Минск, Республика Беларусь)

E-mail: i.zajtsev@bsuir.by

**Аннотация.** Представлены результаты исследования эффективности радиолокационного пеленгатора на базе антенной решетки с подрешетками и комбинированной искусственной нейронной сети в условиях наличия аппаратных дестабилизирующих факторов и внешних помех. Обучающий датасет для искусственной нейронной сети в виде выходных сигналов сетки адаптированных приемных каналов сформирован с учетом амплитудно-фазочастотных неидентичностей, углового сканирования и перестройки частоты. На основе моделирования выполнено сравнение нейросетевого пеленгатора с пеленгатором на основе максимума функции правдоподобия. Показано, что нейросетевой пеленгатор обеспечивает более высокую точность за счет компенсации систематических и уменьшения случайных ошибок. Исследование помехоустойчивости показало сохранение отсутствия систематического смещения оценок и работоспособность метода при снижении отношения сигнал/шум и в условиях воздействия помех. Нейросетевой метод обладает существенно более высоким быстродействием, что делает его эффективным для практического применения в радиолокационных системах.

**Abstract.** The paper presents the results of a study of a neural network-based method for measuring angular coordinates for a radar direction finder based on an antenna array with subarrays. The method is based on a combined artificial neural network architecture that includes convolutional and fully connected components and accounts for the spatial structure of the input data and the observation conditions. The training dataset was generated using mathematical modeling of signals with consideration of amplitude-phase-frequency non-identities, angular scanning, and carrier frequency tuning. Based on the simulation results, a comparison was carried out between the neural network method and the maximum likelihood estimation approach, demonstrating that the neural network provides higher accuracy due to compensation of systematic errors and reduction of random errors. The interference immunity study showed preservation of unbiased estimates and reliable operation of the method under decreasing signal-to-noise ratio and in the presence of interference. The neural network method also features significantly higher computational efficiency, making it effective for practical application in radar systems.

### Введение

В [1] предложена структура радиолокационного пеленгатора на базе антенной решетки (АР) с подрешетками (ПР) и комбинированной искусственной нейронной сетью (ИНС). Целью настоящей статьи является исследование эффективности указанного радиолокационного пеленгатора при наличии амплитудно-фазочастотных неидентичностей (АФЧН) приемных каналов для беспомеховых условий и при наличии помех.

Для достижения заданной цели решаются следующие задачи:

определяется модель АФЧН приемных каналов;

разрабатывается и программно реализуется методика формирования входных и валидационных данных (датасета) для обучения ИНС;

проводится обучение ИНС для различных вариантов ее структуры (числа нейронов в сверточной части и многослойном перцептроне);

проводится анализ точности оценивания угловых координат полезного сигнала и сравнение полученных результатов с потенциально достижимой точностью пеленгования.

### Модель амплитудно-фазочастотных неидентичностей приемных каналов

АФЧН приемных каналов моделировались как произведение двух независимых составляющих

$$\dot{K}_{\text{АФЧН}}(n, n_{\alpha}, n_{\beta}, f_0) = \dot{K}(n, f_0) \cdot \dot{F}(n, n_{\alpha}, n_{\beta}, f_0), \quad (1)$$

где  $n$  – номер подрешетки (приемного канала);  $n_\alpha, n_\beta$  – номер направления наблюдения (направление максимума диаграммы направленности подрешеток) по азимуту и углу места;  $f_0$  – несущая частота.

Первый множитель  $\dot{K}(n, f_0)$  в (1) представляет собой АФЧН радиотракта  $n$ -го приемного канала в составе согласующих устройств, малошумящих усилителей, смесителей, усилителей промежуточной/видеочастоты и т.д. Моделирование АФЧН радиотрактов проводилось в соответствии с выражением

$$\dot{K}(n, f_0) = (1 + \xi_A(n, f_0)) e^{j\xi_\varphi(n, f_0)}, \quad (2)$$

где  $\xi_A(n, f_0)$  – независимые (по  $n, f_0$ ) центрированные нормально распределенные случайные величины со среднеквадратическим отклонением  $\sigma_A$ , которые моделируют отклонение нормированных коэффициентов усиления приемных каналов от единицы;  $\xi_\varphi(n, f_0)$  – аналогичные случайные величины со среднеквадратическим отклонением  $\sigma_\varphi$ , которые моделируют фазовые различия приемных каналов.

Второй множитель  $\dot{F}(n, n_\alpha, n_\beta, f_0)$  в (1) – АФЧН подрешеток, отражает случайный характер нормированных диаграмм направленности подрешеток при фазировании в заданном направлении  $n_\alpha, n_\beta$  и на заданной частоте  $f_0$  из-за частотно-зависимых различий характеристик фазовращателей и аттенюаторов антенных элементов из состава подрешеток. Моделирование АФЧН подрешеток проводилось в соответствии с выражением

$$\dot{F}(n, n_\alpha, n_\beta, f_0) = (1 + \upsilon_A(n, n_\alpha, n_\beta, f_0)) e^{j\upsilon_\varphi(n, n_\alpha, n_\beta, f_0)}, \quad (3)$$

где  $\upsilon_A(n, n_\alpha, n_\beta, f_0)$  и  $\upsilon_\varphi(n, n_\alpha, n_\beta, f_0)$  – независимые (по всем переменным) центрированные нормально распределенные случайные величины со среднеквадратическими отклонениями  $\vartheta_A$  и  $\vartheta_\varphi$ , моделирующие различия амплитудных и фазовых диаграмм направленности подрешеток в направлении полезного сигнала.

### Методика формирования датасета для обучения ИНС

Формирование обучающего датасета основано на математическом моделировании процесса приема сигналов антенной решеткой, построенной на основе подрешеток, при наличии АФЧН приемных каналов, сканировании по угловым координатам и перестройки частоты. Разработанная методика предполагает выполнение следующих операций:

задание геометрии АР прямоугольной формы в виде числа подрешеток по азимуту  $N_y^{\text{ан}}$  и углу места  $N_z^{\text{ан}}$ , суммарного числа  $L = N_y^{\text{ан}} N_z^{\text{ан}}$  подрешеток (приемных каналов); числа  $N_y^{\text{под}}, N_z^{\text{под}}$  антенных элементов в подрешетке по азимуту и углу места и межэлементного расстояния  $d$ ; на основе этих данных по формулам из теории антенн рассчитываются значения ширины главного лепестка подрешетки и антенной решетки в целом по азимуту и углу места [1];

задание максимального  $\alpha(\beta)_{\text{max}}$  и минимального  $\alpha(\beta)_{\text{min}}$  значения угла наблюдения по азимуту (углу места) и максимального  $f_{\text{max}}$  и минимального  $f_{\text{min}}$  значения несущей частоты;

задание числа используемых частот  $N_f$  частот и направлений наблюдения по азимуту  $N_\alpha$  и углу места  $N_\beta$ ;

задание АФЧН путем разыгрывания случайных величин  $\xi_A(n, n_f), \xi_\varphi(n, n_f), \upsilon_A(n, n_\alpha, n_\beta, n_f), \upsilon_\varphi(n, n_\alpha, n_\beta, n_f)$ ,  $n = \overline{1, L}; n_\alpha = \overline{1, N_\alpha}; n_\beta = \overline{1, N_\beta}; n_f = \overline{1, N_f}$  согласно их характеристике в (2) и (3); полученные многомерные случайные матрицы представляют собой совместную модель АФЧН приемных каналов для разных направлений фазирования;

задание объема  $M$  датасета – число независимых наблюдений полезного сигнала;

задание размерности  $J_\alpha \times J_\beta$  сетки адаптированных приемных каналов, формируемых относительно направления наблюдения – направления фазирования куда выставляются максимумы главных лепестков диаграмм направленности подрешеток [1, 2];

задание числа отсчетов  $K$  при формировании выборочной корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов.

Дальнейшее формирование датасета для каждого из  $m = \overline{1, M}$  наблюдений проводится следующим образом:

с помощью датчика случайных чисел разыгрываются номера  $n_\alpha, n_\beta, n_f$  направлений наблюдения и номинала несущей частоты, вычисляются соответствующие указанным номерам значения азимута  $\alpha_{ph}$ , угла места  $\beta_{ph}$  и несущей частоты  $f_0$  и формируется нормированный вектор  $\mathbf{p} = (\alpha_{ph}^H, \beta_{ph}^H, f_0^H)^T$  условий наблюдения [1] с элементами

$$\alpha_{ph}^H = \frac{\alpha_{ph} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \beta_{ph}^H = \frac{\beta_{ph} - \beta_{\min}}{\beta_{\max} - \beta_{\min}}; f_0^H = \frac{f_0 - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}};$$

разыгрывается случайное положение  $(\alpha, \beta)$  радиолокационной цели в пределах главного лепестка диаграммы направленности АР для заданного направления наблюдения;

при наличии источника помех разыгрывается его случайное угловое положение  $(\alpha_\Pi, \beta_\Pi)$  в рабочем секторе АР;

с использованием геометрии АР и формул из теории антенн рассчитываются векторы  $\mathbf{f}(\alpha, \beta)$  и  $\mathbf{f}(\alpha_\Pi, \beta_\Pi)$  нормированных ДН подрешеток в направлении источника полезного сигнала и помехи без учета АФЧН; нормировка проводится к максимуму ДН подрешетки в направлении нормали;

с использованием (1) рассчитываются векторы  $\mathbf{f}_{\text{иск}}(\alpha, \beta)$  и  $\mathbf{f}_{\text{иск}}(\alpha_\Pi, \beta_\Pi)$  нормированных ДН приемных каналов в направлении источника полезного сигнала с учетом АФЧН;

воспроизводится  $k = \overline{0, K}$  вектор отсчетов принимаемой реализации на выходах подрешеток с учетом АФЧН приемных каналов

$$\mathbf{y}_k = \dot{\xi}_k + \sqrt{P_\Pi} \dot{\xi}_k \mathbf{f}_{\text{иск}}(\alpha_\Pi, \beta_\Pi) + \begin{cases} A e^{j\psi} \mathbf{f}_{\text{иск}}(\alpha, \beta), & k = 0; \\ 0, & k = \overline{1, K}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $K$  – число отсчетов, содержащих внутренний шум и внешнюю помеху;  $\dot{\xi}_k, \dot{\xi}_k$  – независимые комплексные центрированные случайные числа с единичной дисперсией;  $P_\Pi$  – мощность источника помех на выходе подрешетки при наблюдении по нормали, нормированная к мощности внутренних шумов приемного канала;  $A$  – амплитуда полезного сигнала на выходе подрешетки при наблюдении по нормали, нормированная к среднеквадратическому значению шума приемного канала; при указанных нормировках отношение сигнал/шум на выходе АР при нахождении источник полезного сигнала по нормали к АР составит  $\rho = A^2 L$ , отношение помеха/шум  $\rho_\Pi = P_\Pi L$ ;

рассчитывается оценка корреляционной матрицы помех [3]

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^H; \quad (5)$$

определяются азимуты и углы места узлов сетки адаптированных приемных каналов при виртуальном сканирования угловых направлений внутри главного лепестка ДН АР на передачу от направления  $\alpha_{ph}, \beta_{ph}$  фазирования [1]:

$$\alpha_i = \alpha_{ph} + \delta\alpha \left( i + \frac{J_\alpha + 1}{2} \right), \quad i = \overline{1, J_\alpha}; \quad \delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{J_\alpha - 1};$$

$$\beta_j = \beta_{ph} + \delta\beta \left( j + \frac{J_\beta + 1}{2} \right), \quad j = \overline{1, J_\beta}; \quad \delta\beta = \frac{\Delta\beta}{J_\beta - 1}, \quad (6)$$

где  $\Delta\alpha(\beta)$  – ширина главного лепестка ДН антенной решетки по азимуту (углу места);

вычисляются нормированные векторы весовых коэффициентов виртуальных приемных каналов

$$\mathbf{w}_n(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) = \frac{\hat{\Phi}^{-1} \mathbf{f}(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p})}{\sqrt{\hat{P}_{\text{п+ш}}(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p})}}, \quad (7)$$

где  $\hat{P}_{\text{п+ш}}(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) = \mathbf{f}^H(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) \cdot \hat{\Phi}^{-1} \cdot \mathbf{f}(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p})$  – оценка мощности остатков помех и взвешенных внутренних шумов приемных каналов для заданного виртуального приемного канала и условий наблюдения; отметим, что если в (5) с учетом (4) используются ДН приемных каналов с учетом АФЧН, то в (7) используются расчетные (модельные) ДН; модельные ДН можно трактовать как ДН подрешеток после проведения калибровки АР, причем  $\mathbf{f}_{\text{иск}}(\alpha, \beta) \neq \mathbf{f}(\alpha, \beta)$ ;

вычисляются входные данные для сверточной части ИНС

$$Z_{i,j} = Z(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) = \left| \mathbf{w}_n^H(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y} \right|^2, \quad (8)$$

и проводится их нормировка к диапазону [0;1]

$$\bar{Z}_{i,j} = \frac{Z_{i,j}}{\max Z_{i,j}}. \quad (9)$$

Матрица  $\bar{\mathbf{Z}}$  представляет собой нормированную двумерную карту отклика, которая может быть интерпретирована как изображение пространственного отклика от цели в сетке адаптированных приемных каналов по азимуту и углу места. Эта матрица подается на вход сверточной части ИНС в виде тензора размерности  $1 \times J_\alpha \times J_\beta$  [1]. Вектор  $\mathbf{p} = (\alpha_{ph}^H, \beta_{ph}^H, f_0^H)^T$  совместно с выходными сигналами сверточной части сети подается на вход составной части ИНС в виде многослойного перцептрона. В качестве выходных величин используются истинные угловые отклонения сигнала от направления фазирования по азимуту и углу места:

$$\varepsilon_\alpha = \alpha - \alpha_{ph}; \quad \varepsilon_\beta = \beta - \beta_{ph}.$$

Результатом одного наблюдения является строка, включающая матрицу  $\bar{\mathbf{Z}}$  (развертывается в строку) нормированных сигналов виртуальных приемных каналов, вектор  $\mathbf{p}$  условий наблюдения и истинные угловые отклонения сигнала от направления фазирования по азимуту и углу места  $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$  с числом элементов  $J_\alpha J_\beta + 5$ .

Формирование датасета реализовано в виде отдельного модуля на языке *Python* с использованием библиотек *PyTorch*, *numpy* и векторизованных функций для повышения производительности. В зависимости от установленного режима работы может использоваться либо сохраненный ранее файл с моделью АФЧН приемных каналов (то есть модель многоканальной приемной системы), либо параметры АФЧН будут разыграны заново и перезаписаны в файл. Результатом работы модуля является файл с датасетом заданного размера.

### Методика и условия обучения комбинированной искусственной нейронной сети

При формировании датасета использовались следующие исходные данные:

АР прямоугольной формы с  $N_y^{\text{ан}} = N_y^{\text{пол}} = 6$ ;  $N_z^{\text{ан}} = N_z^{\text{пол}} = 4$ ;  $L = 24$ ;  $d = 0,015$  м;  $\Delta\alpha = 2,8^\circ$ ;  $\Delta\beta = 6,4^\circ$  (на средней частоте);

число несущих частот  $N_f = 201$ , диапазон перестройки несущей частоты 9,9...10,1 ГГц с шагом 10 МГц;

направления фазирования подрешеток случайно задавалось по азимуту в секторе  $\pm 45^\circ$  и по углу места в секторе  $0 \dots 30^\circ$  при  $N_\alpha = 32$ ;  $N_\beta = 5$ ;

угловое положение полезного сигнала выбиралось в пределах половины ширины ГЛ ДН относительно направления фазирования;

параметры АФЧН  $\sigma_A = \vartheta_A = 0,1$ ;  $\sigma_\varphi = \vartheta_\varphi = 15^\circ$ .

Архитектура комбинированной ИНС приведена в [1]. На первом этапе входное изображение  $\bar{\mathbf{Z}}$  обрабатывается сверточной частью сети. Первый сверточный слой принимает один входной канал и формирует 16 карт признаков с использованием ядер размером  $3 \times 3$  и один пиксель дополнения по краям. Это позволяет сохранить исходную размерность  $5 \times 5$  и извлекать локальные пространственные зависимости между соседними элементами. После свертки применяется нелинейная функция активации ReLU.

Второй сверточный слой увеличивает число каналов до 32, также используя ядра размером  $3 \times 3$  и дополнение, сохраняющее пространственные размеры. Данный слой позволяет формировать более сложные и абстрактные пространственные признаки, учитывающие взаимосвязи между откликами в различных направлениях.

После прохождения сверточных слоев полученный тензор размерности  $32 \times 5 \times 5$  преобразуется в одномерный вектор длины 800, который подается на полносвязный слой. Этот слой уменьшает размерность до 128 и выполняет роль агрегатора извлеченных пространственных признаков. Далее осуществляется объединение признаков, полученных из сверточной части, с дополнительными параметрами условий наблюдения. Для этого вектор размерности 128 конкатенируется с вектором из трех признаков, в результате чего формируется общий вектор размерности 131.

Полученный вектор поступает на вход многослойного персептрона, состоящего из двух полносвязных слоев. Первый слой уменьшает размерность до 64, второй – до 32. На каждом этапе применяется функция активации *ReLU*.

Выходной слой является линейным и формирует выходной вектор размерности 2, соответствующий оценкам отклонений угловых координат по азимуту и углу места от направления фазирования.

Следует отметить, что в используемой архитектуре отсутствуют операции подвыборки (*pooling*), что обусловлено малым размером входных данных. Сохранение полного пространственного разрешения позволяет избежать потери информации, критически важной для точного определения положения максимума отклика.

При обучении принимались следующие исходные данные:

число наблюдений в датасете  $M = 2^{17}$  из которых 1000 тестовых наблюдений;

отношение сигнал/шум (*SNR*) при обучении ИНС в подрешетке составляло 50 дБ (предельно высокий уровень, соответствующий, фактически, отсутствию шума);

число эпох обучения варьировалось в диапазоне 2...15 тысяч.

Обучение комбинированной ИНС проводилось на сформированном датасете, содержащем входные данные и соответствующих им истинных значений угловых отклонений. Задача обучения формулируется как задача регрессии, в которой модель восстанавливает значения отклонений по азимуту и углу места на основе входного пространственного распределения отклика системы и дополнительных параметров наблюдения.

Перед обучением данные были приведены к формату тензоров фиксированной размерности. Входные изображения нормированы, что обеспечивает устойчивость процесса обучения и снижает влияние изменений уровня сигнала.

В качестве функции потерь использовалась среднеквадратичная ошибка (*MSE*), обеспечивающая минимизацию отклонения предсказанных значений от истинных. Оптимизация параметров модели выполнялась с использованием градиентного метода с адаптивной настройкой шага обучения (*Adam*).

Оценка точности пеленгации проводилась с использованием средней  $m_\varepsilon = \overline{\hat{\varepsilon} - \varepsilon}$  ошибки пеленгации, среднеквадратической ошибки пеленгации  $\sigma_\varepsilon = \overline{(\hat{\varepsilon} - \varepsilon)^2}$ , межквартильного размаха  $IQR = q_{0,75} - q_{0,25}$  и 90-процентной ширины распределения ошибок  $\Omega = q_{0,95} - q_{0,05}$ , где  $q_p$  – квантиль функции распределения ошибки для уровня вероятности  $p$ .

### Результаты обучения ИНС и анализ результатов

На рис. 1 для одной из реализаций АФЧН приемных каналов представлена зависимость значения функции потерь от номера эпохи обучения.

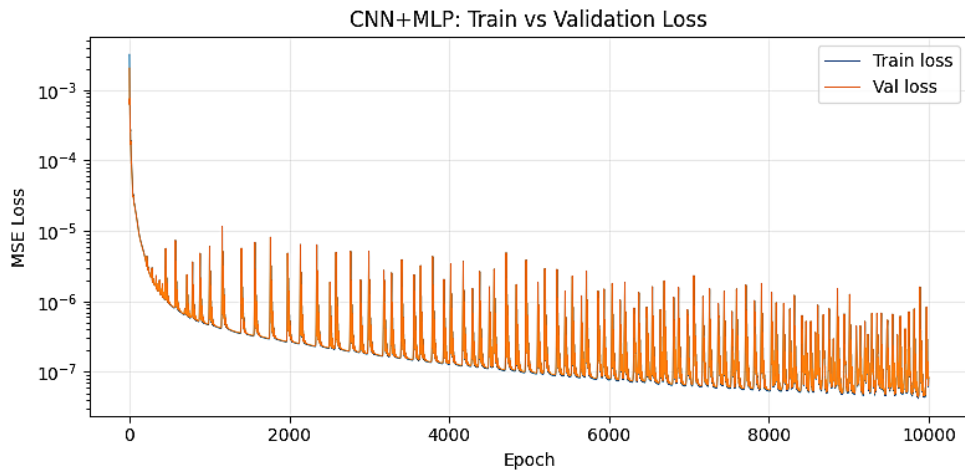


Рис. 1. Зависимости функции потерь от номера эпохи

Из рис. 1 видно, что на начальных этапах обучения происходит быстрое снижение функции потерь, что связано с извлечением моделью основных закономерностей из данных. По мере увеличения числа эпох уменьшение ошибки замедляется и процесс обучения стабилизируется. В процессе обучения наблюдается снижение среднеквадратичной ошибки на обеих выборках, сопровождающееся периодическими скачками функции потерь. Эти скачки обусловлены стохастическим характером оптимизации (алгоритм *Adam*), при которой оценка градиента на разных случайных подмножествах обучающих примеров приводит к флуктуациям ошибки, а также наличием шумов и АФЧН приемных каналов.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения ошибок пеленгации для метода оценивания угловых координат на основе вычисления максимума функции правдоподобия при высоком уровне отношения сигнал/шум ( $SNR = 50$  дБ).

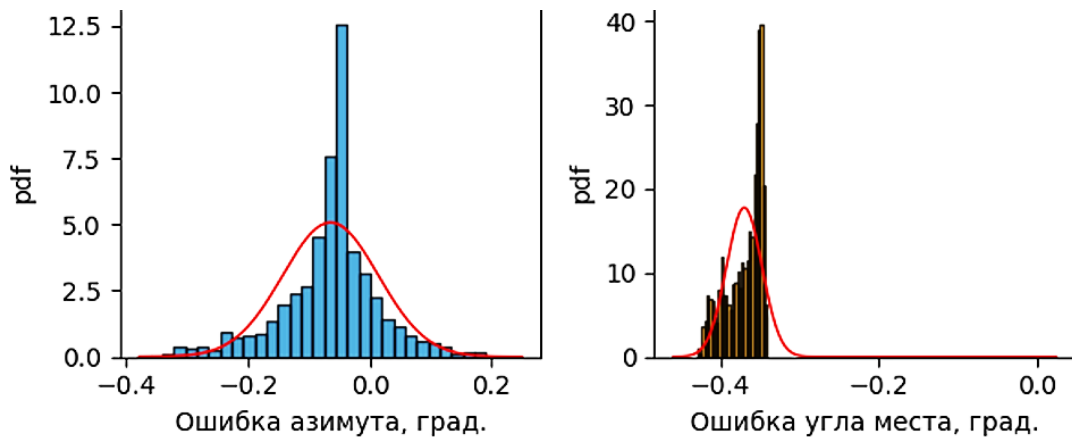


Рис. 2. Гистограммы ошибок пеленгации для статистически оптимального алгоритма без использования калибровочных таблиц при  $SNR=50$  дБ

Вычисление максимально правдоподобных оценок (с учетом преодоления априорной неопределенности) проводилось градиентным методом согласно алгоритму

$$\hat{\alpha}, \hat{\beta} = \arg \max_{\alpha, \beta} \left| \frac{\hat{\Phi}^{-1} \mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})}{\sqrt{\mathbf{f}^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \hat{\Phi}^{-1} \mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})}} \cdot \mathbf{y} \right|^2. \quad (10)$$

Для данного случая статистические параметры ошибок составили в азимутальной и угломестной плоскостях

$$m_{\alpha} = -0,06^{\circ}, \sigma_{\alpha} = 0,079^{\circ}, IQR_{\alpha} = 0,063^{\circ}, \Omega_{\alpha} = 0,273^{\circ};$$

$$m_{\beta} = -0,37^{\circ}, \sigma_{\beta} = 0,022^{\circ}, IQR_{\beta} = 0,034^{\circ}, \Omega_{\beta} = 0,068^{\circ}.$$

Примечательным является два обстоятельства. Во-первых, по обеим координатам присутствует выраженная систематическая ошибка, причем по углу места она составляет  $-0,37^\circ$ , то есть примерно 5,8% от ширины луча. Во-вторых, СКО пеленгации оказалась в 20...80 раз больше, чем по формуле потенциальной точности измерения, причем по азимуту СКО пеленгации больше, чем по углу места, что противоречит геометрии АР. Это является следствием наличия АФЧН приемных каналов – для каждого направления наблюдения и несущей частоты возникает систематическая ошибка пеленгации. Далее эта ошибка усредняется при сканировании, что и приводит к возрастанию СКО пеленгации, а также появлению систематической ошибки. Для угла места систематическая ошибка выше, так как сканирование проводится только в положительном направлении.

Для устранения этого явления нужно иметь калибровочную таблицу из  $2N_\alpha N_\beta N_f$  значений, содержащих значения систематической ошибки пеленгации по азимуту и углу места для всех направлений сканирования и несущих частот. Кроме того, решение оптимизационной задачи (10) градиентным методом в типовых случаях требует 30...90 итераций, что является очень трудоемким, слабо предсказуемым по времени и затрудняет построение подсистемы цифровой обработки сигналов радиолокатора.

На рис. 3 приведены гистограммы ошибок для пеленгатора с ИНС после обучения на этом же датасете на контрольной выборке при том же уровне  $SNR = 50$  дБ (в подрешетке).

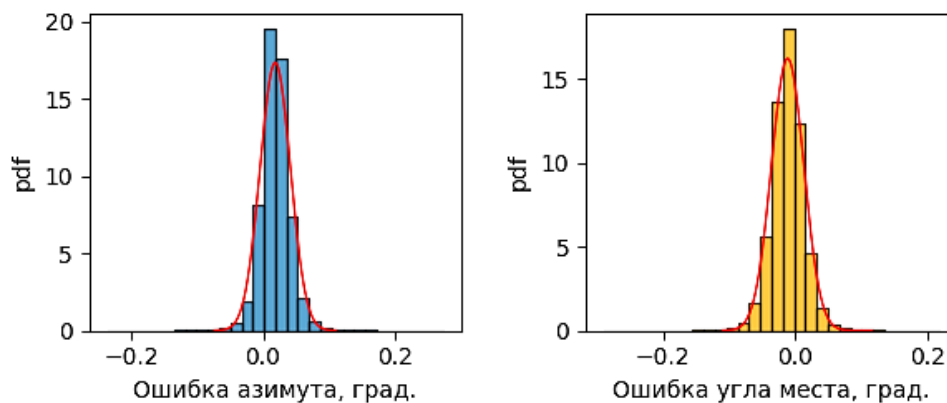


Рис. 3. Гистограммы ошибок пеленгации для контрольной выборки после обучения ИНС при  $SNR=50$  дБ

Для случая использования ИНС статистические параметры ошибок пеленгации при  $SNR=50$  дБ составят:

$$m_\alpha = 0,02^\circ, \sigma_\alpha = 0,023^\circ, IQR_\alpha = 0,025^\circ, \Omega_\alpha = 0,068^\circ;$$

$$m_\beta = -0,01^\circ, \sigma_\beta = 0,025^\circ, IQR_\beta = 0,029^\circ, \Omega_\beta = 0,077^\circ.$$

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что нейросетевой метод обеспечивает существенное уменьшение ошибок пеленгации. Практически полностью устраняются систематические ошибки и существенно снижается разброс оценок. Кроме того, достигается более высокая концентрация оценок вблизи истинного значения при существенно меньшей вероятности выбросов. Тем не менее, при предельно высоких  $SNR$  СКО пеленгации с использованием ИНС оказывается заметно, в 10...20 раз больше, чем потенциально достижимое значение. Это связано с ошибками аппроксимации отклика сигнала в пространственной области ограниченным числом дискретных значений.

Аналогичный результат мог бы быть получен и при использовании оценок максимального правдоподобия (10) с использованием калибровочных таблиц. При использовании комбинированной ИНС эти калибровочные таблицы, фактически, отражаются в весовых коэффициентах многослойного персептрона, что позволяет ИНС устранять систематические ошибки пеленгования для каждого направления наблюдения, возникающие из-за наличия АФЧН. Основной эффект от использования комбинированной ИНС состоит в обеспечении полностью прогнозируемого времени оценивания угловых координат цели, что резко отличается от варианта оценок (10) градиентным методом. В этом смысле пеленгатор на основе комбинированной ИНС можно рассматривать как прямоотсчетный измеритель, аналогичный, например, классическому амплитудному суммарно-разностному пеленгатору [2-4].

Обученная при  $SNR=50$  дБ ИНС использовалась для получения статистических характеристик ошибок пеленгации для датасетов, рассчитанных при  $SNR=20$ ; 10 и 0 дБ (в подрешетке) при той же модели АФЧН. Результаты приведены на рис. 4-6. Сплошной кривой на всех рисунках показана плотность вероятности нормального распределения при выборочных значениях математического ожидания и СКО.

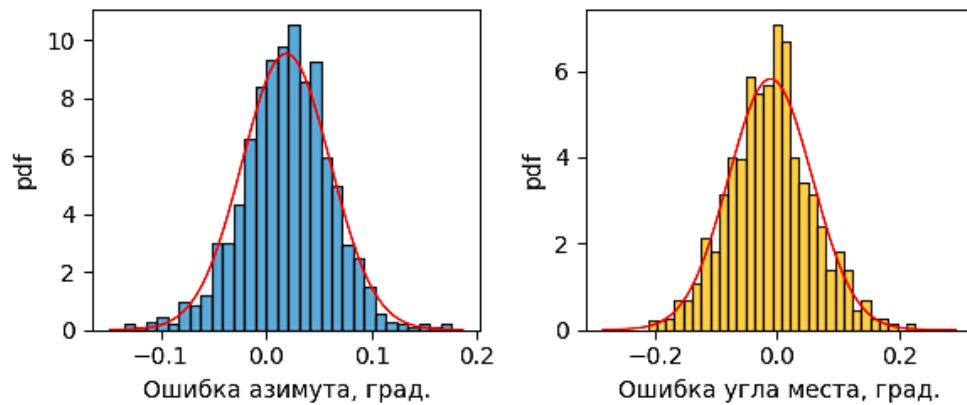


Рис. 4. Гистограммы ошибок пеленгации для беспомеховых условий при  $SNR=20$  дБ

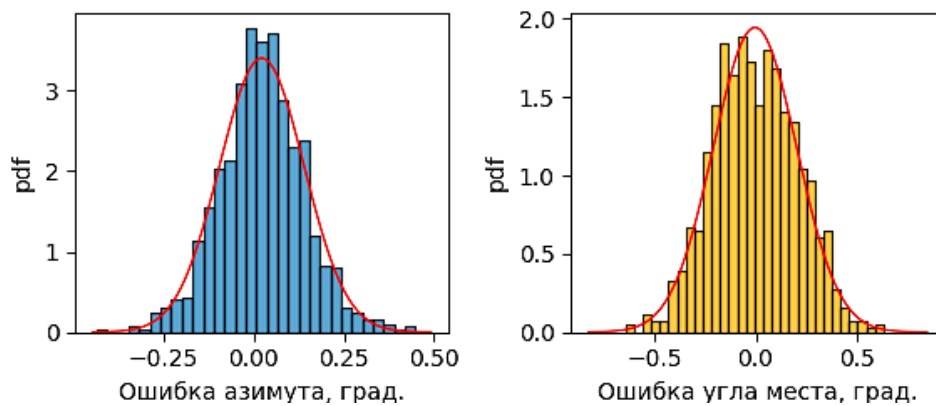


Рис. 5. Гистограммы ошибок пеленгации для беспомеховых условий при  $SNR=10$  дБ

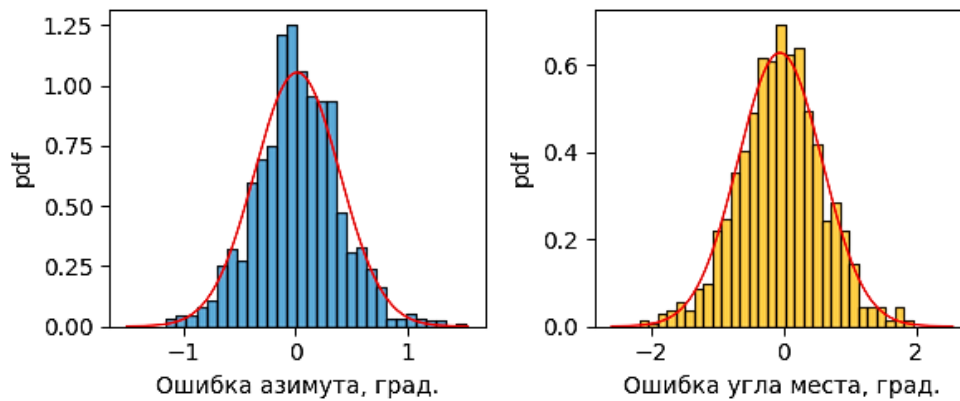


Рис. 6. Гистограммы ошибок пеленгации для беспомеховых условий при  $SNR=0$  дБ

Статистические параметры ошибок пеленгации составили:

при  $SNR=20$  дБ –  $m_\alpha=0,02^\circ$ ,  $\sigma_\alpha=0,042^\circ$ ,  $IQR_\alpha=0,05^\circ$ ,  $\Omega_\alpha=0,14^\circ$ ;  $m_\beta=-0,01^\circ$ ,  $\sigma_\beta=0,07^\circ$ ;  $IQR_\beta=0,08^\circ$ ,  $\Omega_\beta=0,23^\circ$ ;

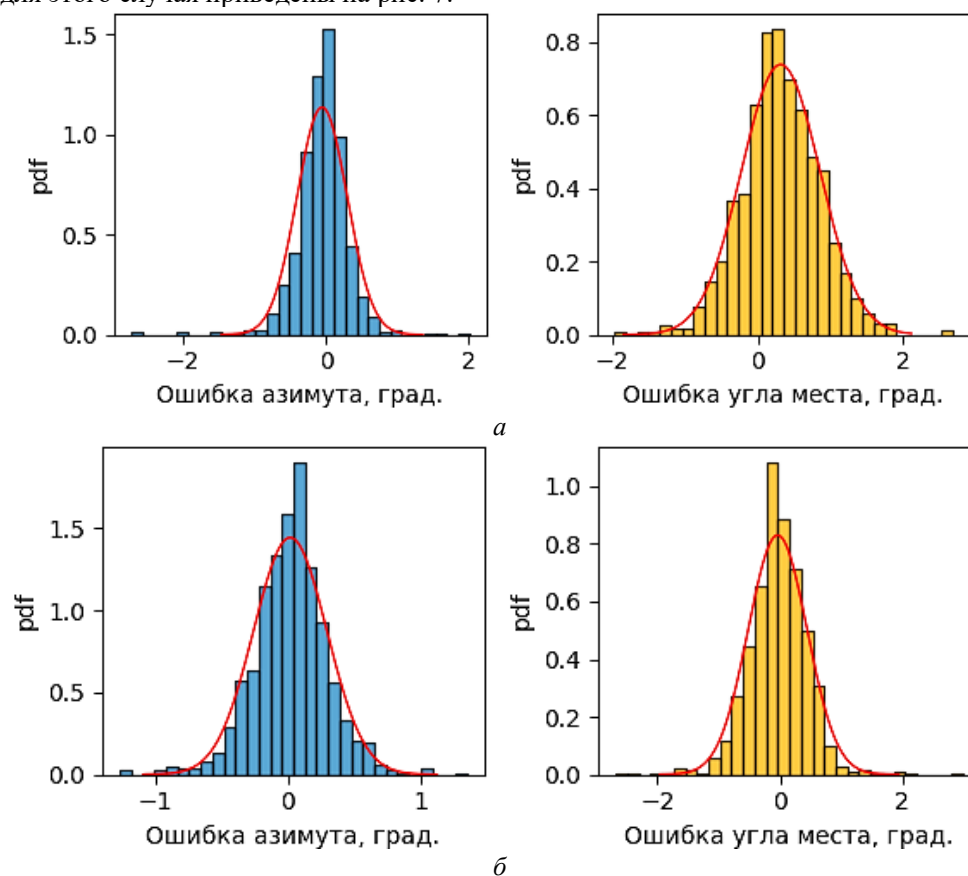
при  $SNR=10$  дБ –  $m_\alpha=0,02^\circ$ ,  $\sigma_\alpha=0,12^\circ$ ,  $IQR_\alpha=0,15^\circ$ ,  $\Omega_\alpha=0,38^\circ$ ;  $m_\beta=-0,01^\circ$ ,  $\sigma_\beta=0,21^\circ$ ;  $IQR_\beta=0,29^\circ$ ,  $\Omega_\beta=0,67^\circ$ ;

при  $SNR=0$  дБ –  $m_\alpha=0,01^\circ$ ,  $\sigma_\alpha=0,38^\circ$ ,  $IQR_\alpha=0,47^\circ$ ,  $\Omega_\alpha=1,26^\circ$ ;  $m_\beta=-0,05^\circ$ ,  $\sigma_\beta=0,63^\circ$ ;  $IQR_\beta=0,80^\circ$ ,  $\Omega_\beta=2,0^\circ$ .

При уменьшении  $SNR$  в подрешетке от 20 дБ до 0 дБ наблюдается закономерный рост случайной составляющей ошибки. Близкие к нулю значения средней ошибки свидетельствуют об отсутствии систематического смещения оценок, вызванных АФЧН приемных каналов. При снижении  $SNR$  основное влияние проявляется не в смещении, а в росте разброса оценок, что говорит о сохранении работоспособности и приемлемой точности метода даже в условиях низких  $SNR$ . Отметим, что обучение ИНС требуется один раз при предельно высоких  $SNR$ . Этот вывод отличается от приведенного в [5], где рекомендуется проводить обучение и использовать обученную ИНС для всех возможных значений  $SNR$  с определенной дискретностью.

Другой важный вывод заключается в том, что статистические показатели точности пеленгации при практически важных  $SNR$  (20...0 дБ в подрешетке, 46...26 дБ в АР) приближаются к потенциально достижимой точности пеленгации с отличием до 1,5...2 раз.

Обученная для беспомеховых условий комбинированная ИНС использовалась для получения статистических характеристик ошибок пеленгации при наличии одного мощного источника помех. Результаты для этого случая приведены на рис. 7.



**Рис. 7.** Гистограммы ошибок пеленгации при  $SNR$  в подрешетке 20 дБ при наличии внешней помехи с отношением помеха/шум в подрешетке 50 дБ: а – пеленгация статистически оптимальным методом; б – пеленгация с использованием комбинированной ИНС

При наличии мощной внешней помехи ошибки закономерным образом возросли, что связано с возрастанием мощности взвешенных внутренних шумов приемных каналов и частичным подавлением полезного сигнала, особенно при близком угловом положении источника помех и полезного сигнала [3, 4]. Из гистограмм видно, что комбинированная ИНС обеспечивает более высокую точность пеленгации и устойчивость к помехам по сравнению со статистически оптимальным алгоритмом без использования калибровочных таблиц. Устраняются систематические смещения, наблюдается уменьшение разброса оценок как по азимуту, так и по углу места, а также сужение хвостов распределения, что снижает вероятность аномальных ошибок.

### **Заключение**

Проведенное исследование показало, что применение радиолокационного пеленгатора на базе антенной решетки с подрешетками и комбинированной искусственной нейронной сети позволяет в условиях наличия АФЧН приемных каналов обеспечить оценивание угловых координат радиолокационной цели с точностью, сопоставимой с потенциально достижимой. Основным преимуществом использования комбинированной ИНС в сравнении со статистически оптимальным методом является обеспечение прямых оценок угловых координат без использования градиентных процедур поиска максимума двух переменных и использования градуировочных таблиц большой размерности. Комбинированная ИНС после обучения для предельно высоких отношений сигнал/шум реализует прямое отображение выходных сигналов схемы цифрового диаграммообразования антенной решетки в оценки угловых координат, что обеспечивает высокую скорость обработки и делает метод пригодным для применения в системах реального времени.

### **Список использованных источников**

1. Дубовик, И. А. Радиолокационный пеленгатор на базе антенной решетки с подрешетками и комбинированной искусственной нейронной сети / И. А. Дубовик, И. А. Зайцев, С. В. Козлов // в наст. сборнике.
2. Григорьев, Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010, – 144 с.
3. Ратынский, М.В., Порсев В.И. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР / Под ред. В.И. Порсева. – М.: Радиотехника, 2019. – 160 с.
4. Козлов, С. В. Пеленгационные антенные системы с пространственной компенсацией помех : учеб.-метод. пособие / С. В. Козлов. – Минск : БГУИР, 2019. – 158 с.
5. Шацкий, Н.В. Нейросетевой метод оценки угловых координат радиолокационных целей в цифровой антенной решетке / Н.В. Шацкий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022, Том 16, №7. – С. 4-13.