

УДК 621.396.677.51:004.8

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ПЕЛЕНГАТОР НА БАЗЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПОДРЕШЕТКАМИ И КОМБИНИРОВАННОЙ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

И.А. ДУБОВИК¹, И.А. ЗАЙЦЕВ², С.В. КОЗЛОВ²

¹Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

E-mail: i.zajtsev@bsuir.by

Аннотация. Предложен вариант построения радиолокационного пеленгатора на базе антенной решетки с подрешетками для измерения угловых координат цели при наличии перестройки частоты и амплитудно-фазочастотных неидентичностей (АФЧН) приемных каналов подрешеток. Основу измерителя угловых координат составляет комбинированная искусственная нейронная сеть, состоящая из сверточной сети для анализа пространственных признаков в выходных сигналах виртуальных приемных каналов и многослойного перцептрона, который формирует оценку угловых координат с учетом направлений фазирования, перестройки несущей частоты и АФЧН каналов.

Abstract. A variant of a radar direction finder based on an antenna array with subarrays is proposed for measuring target angular coordinates under frequency hopping and amplitude-phase-frequency non-identities of the subarray receiving channels. The core of the angular coordinate estimator is a combined artificial neural network comprising a convolutional neural network for spatial feature analysis in the output signals of virtual receiving data channels and a multilayer perceptron that estimates the angular coordinates while accounting for scanning directions, carrier frequency tuning, and amplitude-phase-frequency non-identities of channels.

Введение

В настоящее время требования к точности оценивания угловых координат (УК) воздушных объектов для радиолокационных средств все больше возрастают. Это вызвано необходимостью эффективно решать задачи обнаружения и сопровождения радиолокационных целей в условиях сложной электромагнитной обстановки. Для обеспечения высокой помехоустойчивости измерителей УК используют многоканальные приемные системы с разделением апертуры антенной решетки (АР) на подрешетки (ПР) и оптимальные алгоритмы обработки сигналов, включая методы цифрового диаграммообразования (ЦДО), обнаружения и измерения координат [1].

Проблемный вопрос измерения УК, в отличие от определения дальности и скорости радиолокационной цели, состоит в трудностях формирования эталонного распределения амплитуд выходных сигналов системы обработки как при физическом, так и при виртуальном сканировании заданной угловой области. Наиболее простым и часто используемым является вариант формирования разностных и суммарного каналов, отношения выходных сигналов которых прямо определяют угловые координаты цели. В качестве альтернативы суммарно-разностному методу [2] используется подход, при котором осуществляется дискретный перебор возможных угловых положений цели с вычислением значения функции правдоподобия для каждого из них и последующим выбором оценки угла, соответствующей ее максимальному значению [3]. Его ограничением являются крайне высокие вычислительные затраты, обусловленные необходимостью нахождения аргумента максимума решающей статистики в пределах главного лепестка (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) АР в реальном масштабе времени.

Дополнительные трудности возникают при использовании перестройки рабочей частоты радиолокатора, применяемой для повышения устойчивости к естественным и преднамеренным помехам. Поскольку ДН и крутизна пеленгационной характеристики зависят от несущей частоты f_0 , любое отклонение частоты принимаемого сигнала от опорной вызывает физическое смещение лучей сетки и соответствующее смещение максимума функции правдоподобия. Для компенсации этого эффекта требуется введение поправок, что еще больше усложняет алгоритмическую структуру пеленгатора. Ситуация также усложняется наличием амплитудно-фазочастотных неидентичностей (АФЧН) приемных каналов АР с подрешетками.

В последнее время в разных разделах радиотехники интенсивно развиваются подходы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Их применяют для детектирования, распознавания и обработки сигналов. Такие сети способны извлекать скрытые закономерности и обладают природным параллелизмом

вычислений, благодаря чему становятся привлекательным средством обработки сигналов в многоканальных приемных системах. В частности, для уменьшения вычислительной сложности, присущей алгоритму анализа функции правдоподобия, может быть предложено использование ИНС для вычисления оценки УК. К примеру, как показано в [3], элементы нормированной верхнетреугольной корреляционной матрицы (КМ) содержат всю необходимую информацию об УК источников сигналов и могут служить входным вектором для ИНС.

Актуальность этого направления подтверждают научные публикации, в которых ИНС используются для определения УК целей, а также исследуются разные типы архитектур ИНС [4-7].

Целью настоящей работы является разработка варианта построения пеленгатора с формированием сетки каналов на основе виртуального сканирования пространственной области с использованием ИНС, обеспечивающего эффективную работу устройства с перестройкой частоты и АФЧН приемных каналов и позволяющего отказаться от использования поправочных таблиц для упрощения процесса пеленгации с обеспечением точности измерения УК, близкой к потенциально достижимой.

Пеленгатор с виртуальным сканированием пространственной области

Метод определения УК на основе виртуального сканирования заданной пространственной области в пеленгаторе реализуется с использованием цифровой фазированной антенной решетки (ЦФАР), разделенной на подрешетки (ПР). Рассматривается АР, которая состоит из $L = N_y^{\text{ан}} N_z^{\text{ан}}$ ПР, организованных в прямоугольную структуру – по оси азимута (Oy) расположено $N_y^{\text{ан}}$ ПР, а по оси угла места (Oz) – $N_z^{\text{ан}}$ ПР. Каждая ПР представляет собой решетку из $N_y^{\text{под}} \times N_z^{\text{под}}$ антенных элементов (АЭ) с индивидуальными фазовращателями (ФВ), обеспечивающими электронное управление лучом ПР по азимуту и углу места. Расстояние между отдельными излучателями составляет $\lambda/2$ для исключения побочных главных максимумов в ДН. При средней несущей частоте $f_0 = 10$ ГГц, $N_y^{\text{ан}} = N_y^{\text{под}} = 6$; $N_z^{\text{ан}} = N_z^{\text{под}} = 4$ физические размеры всей АР составляют $6 \cdot 6 \cdot (\lambda/2) = 18\lambda$ по азимуту и $4 \cdot 4 \cdot (\lambda/2) = 8\lambda$ по углу места. Потенциальная точность измерений в таком пеленгаторе зависит от ширины ГЛ ДН, которая для всей решетки вычисляется по азимуту как $\Delta\alpha = 51^\circ \cdot \lambda / (N_y^{\text{ан}} \cdot N_y^{\text{под}} \cdot d)$ и по углу места как $\Delta\beta = 51^\circ \cdot \lambda / (N_z^{\text{ан}} \cdot N_z^{\text{под}} \cdot d)$.

Процедура пеленгации с формированием сетки приемных каналов сводится к решению оптимизационной задачи по нахождению оценки угловых координат $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ в пределах ГЛ ДН. В данном случае измерение УК может выполняться как с компенсацией помех, так и без ее применения.

В случае использования адаптивной пространственной компенсации помех выражение для оценок УК будет иметь вид [2]

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}, \hat{\beta} &= \arg \max_{\alpha, \beta, t=t_r} \frac{|V\{\mathbf{w}^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y}(t)\}|^2}{\mathbf{w}^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \hat{\Phi} \cdot \mathbf{w}(\alpha, \beta, \mathbf{p})} = \\ &= \arg \max_{\alpha, \beta, t=t_r} \left| \frac{V\{\mathbf{w}^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y}(t)\}}{\sqrt{\hat{P}_{\text{п+ш}}(\alpha, \beta, \mathbf{p})}} \right|^2 = \arg \max_{\alpha, \beta, t=t_r} |V\{\mathbf{w}_n^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y}(t)\}|^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где t_r – времени задержки отраженного сигнала; V – оператор, отражающий накопление сигналов в устройствах внутрипериодной (ВПО) и междупериодной (МПО) обработки радиолокатора;

$$\mathbf{w}(\alpha, \beta, \mathbf{p}) = \hat{\Phi}^{-1} \mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \quad (2)$$

– вектор весовых коэффициентов (ВВК), оптимальный по критерию максимизации отношения сигнал/(шум + помеха) (ОСШП) при приеме отраженного сигнала с углового направления (α, β) и заданного направления наблюдения по азимуту α_{ph} , углу места β_{ph} и несущей частоты f_0 , объединенных в вектор $\mathbf{p} = (\alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0)^T$ условий наблюдения; H – знак эрмитового сопряжения; $\mathbf{y}(t) = (\dot{Y}_1(t), \dots, \dot{Y}_L(t))^T$ – вектор выходных сигналов $\ell = \overline{1, L}$ ПР АР; $\hat{\Phi}$ – оценка КМ случайных процессов на выходах приемных каналов, соответствующих ПР радиолокатора; $\hat{P}_{\text{п+ш}}(\alpha, \beta, \mathbf{p}) = \mathbf{w}^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \hat{\Phi} \cdot \mathbf{w}(\alpha, \beta, \mathbf{p})$ – оценка мощности остатков помех и взвешенных

внутренних шумов приемных каналов для заданного направления и условий наблюдения;

$$\mathbf{w}_n(\alpha, \beta, \mathbf{p}) = \frac{\hat{\Phi}^{-1} \mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})}{\sqrt{\hat{P}_{\text{п+ш}}(\alpha, \beta, \mathbf{p})}} \quad (3)$$

– нормированный ВВК.

Задача (1) может быть решена классическими численными методами, такими как градиентный спуск или метод Ньютона. Однако практическая реализация таких алгоритмов в реальном масштабе времени сталкивается с высокими вычислительными затратами при решении систем линейных уравнений для каждого узла пространственной сетки, что при пеленгации в двух плоскостях приводит к квадратичному росту объема вычислений.

При реализации алгоритма пеленгования без компенсации помех предполагается, что $\hat{\Phi} = \hat{\Phi}^{-1} = \mathbf{I}$, $\mathbf{w}(\alpha, \beta, \mathbf{p}) = \mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})$ и выражение для оценок УК упрощается до вида (аргумент времени опущен)

$$\hat{\alpha}, \hat{\beta} = \arg \max_{\alpha, \beta} \frac{|\mathbf{f}^H(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y}|^2}{|\mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})|^2} = \arg \max_{\alpha, \beta} |\mathbf{w}_n(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y}|^2 \quad (4)$$

где

$$\mathbf{w}_n(\alpha, \beta, \mathbf{p}) = \frac{\mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})}{|\mathbf{f}(\alpha, \beta, \mathbf{p})|}. \quad (5)$$

Алгоритм (4) является полностью аналогичным (1), за исключением процедуры вычисления нормированного ВВК. В выражении (4) для упрощения записи не приведены зависимость от времени и оператор V оптимального накопления сигнала в радиолокаторе.

Для процесса пеленгации согласно (1) или (4) осуществляется последовательное виртуальное сканирование угловых направлений внутри ГЛ ДН АР на передачу векторами (2) или (5), в процессе которого вычисляются значения оценки вида $Z(\alpha, \beta, \mathbf{p}) = |\mathbf{w}_n(\alpha, \beta, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y}|^2$ с последующим нахождением аргумента максимума в угловой заданной области.

Более сложный алгоритм пеленгации с адаптивной пространственной компенсацией помех (1), по сравнению с алгоритмом (4), может быть реализован на ИНС двумя стратегиями.

Первая стратегия заключается в подаче на вход ИНС нормированной КМ процессов на выходах приемных каналов, а также нормированных выходных сигналов ПР, с последующей реализацией математических операции согласно (1). Указанный вариант исследовался в [5] для малоэлементного пеленгатора, реализованного на базе квадрантной АР.

Если число ПР в рассматриваемой АР составляет L , то в рамках первой стратегии реализации ИНС для описания верхнего треугольника КМ с учетом ее эрмитовости требуется $\frac{L(L+1)}{2}$ значений. Из них L элементов,

расположенных на главной диагонали, являются действительными и характеризуют мощность процессов в каждом канале, остальные $\frac{L(L+1)}{2} - L = \frac{L^2 - L}{2}$ элементов являются комплексными. Они описывают взаимную корреляцию между подрешетками. Для того чтобы ИНС могла эффективно обрабатывать эту информацию, комплексные составляющие необходимо преобразовать в действительные числа, например, путем выделения их модулей и фаз, как в [5]. При суммировании L действительных диагональных элементов и удвоенного числа

комплексных элементов итоговое число входов в части КМ составит $L + 2 \cdot \frac{L^2 - L}{2} = L^2$. Помимо параметров КМ необходимы выходные сигналы ПР. С учетом необходимости передачи комплексных амплитуд в квадратурном представлении, это добавляет еще $2L$ элементов. То есть общее число входных сигналов для ИНС, реализующего данную стратегию, описывается выражением $L_{\text{нс}} = L^2 + 2L$.

Применение этой формулы для типовых конфигураций пеленгаторов демонстрирует значительный рост размерности входных данных при увеличении числа каналов: так, для классической квадрантной антенной решетки, где $L = 4$, количество входных сигналов составляет $L_{\text{нс}} = 24$, а для системы с 4 ПР по азимуту и углу места ($L = 16$) размерность возрастает до $L_{\text{нс}} = 288$. Квадратичная зависимость числа входов от количества ПР является существенным недостатком первой стратегии, так как чрезмерное увеличение количества сигналов

входного слоя ИНС затрудняет процесс обучения и требует большого объема обучающей выборки. В связи с этим первая стратегия может быть использована для малоэлементных АР с небольшим числом ПР.

Во второй стратегии на вход ИНС подаются величины $Z_{i,j} = Z(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) = \left| \mathbf{w}_H^H(\alpha_i, \beta_j, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{y} \right|^2$, которые являются выходными сигналами схемы ЦДО. Указанные величины $Z_{i,j}$ вычисляются с заданной угловой дискретностью $\delta\alpha, \delta\beta$ по азимуту и углу места в пределах ГЛ ДН АР на передачу от направления α_{ph}, β_{ph} наблюдения

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

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

где J_α, J_β – размеры сетки по азимуту и углу места.

Предлагаемый подход аналогичен [7], однако дополнен нормировкой выходного сигнала к оценке мощности остаточных помех и взвешенных внутренних шумов. Также целесообразно приводить нормировку входных сигналов ИНС к диапазону $[0;1]$ в виде $\bar{Z}_{i,j} = \frac{Z_{i,j}}{\max Z_{i,j}}$. Иллюстрация формирования системы приемных каналов приведена на рис. 1.

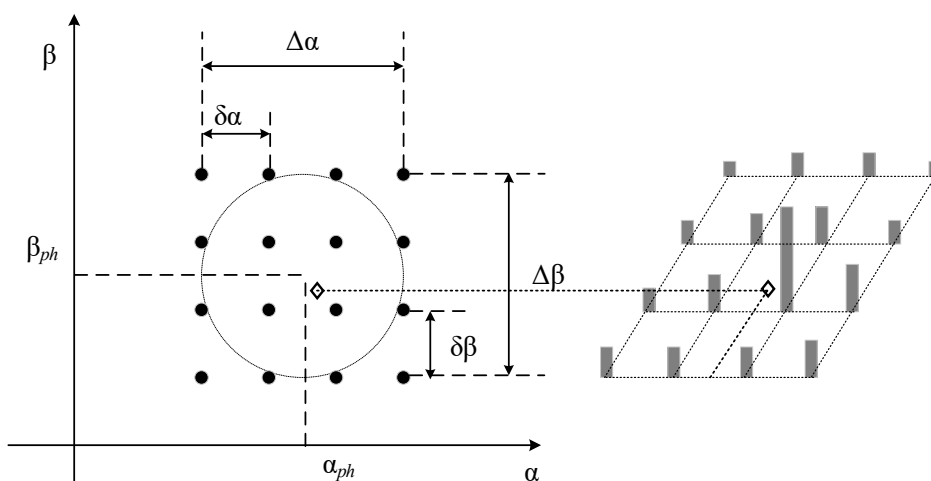


Рис. 1. Иллюстрация формирования приемных каналов для ИНС

Для второй стратегии число входных сигналов ИНС-измерителя УК требует обоснования с использованием моделирования, но, опираясь на результаты [7, 8] предварительно можно выбрать от $L_{нс} = 4$ для беспомеховых условий до $L_{нс} = 16...36$ для условий сложной помеховой обстановки. Преимуществом второй стратегии относительно первой является то, что число входных сигналов ИНС-измерителя перестает напрямую зависеть от L и определяется лишь требуемой дискретностью при виртуальном сканировании для обеспечения заданной точности.

Для учета зависимости от условий наблюдения на вход ИНС также подаются нормированные значения азимута, угла места и несущей частоты, вычисляемые по формулам

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

где $\alpha(\beta)_{\max}, \alpha(\beta)_{\min}$ – максимальные и минимальные значения угла наблюдения по азимуту (углу места) соответственно; f_{\max}, f_{\min} – максимальные и минимальные значения несущей частоты.

Выходами ИНС являются абсолютные угловые отклонения (в радианах) отраженного сигнала от направления наблюдения, вычисляемые согласно следующим выражениям:

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

где α, β – истинные азимутальный и угломестный углы полезного сигнала. При типовых значениях ширины ГЛ ДН АР радиолокатора в диапазоне $(1 \dots 10)^{\circ}$ по азимуту и углу места абсолютные значения величин $\varepsilon_{\alpha}, \varepsilon_{\beta}$ будут заведомо меньше единицы.

Архитектура искусственных нейронных сетей для измерения угловых координат

Рассматриваемый вариант пеленгатора с формированием сетки приемных каналов содержит пространственные данные в виде выходных сигналов сетки приемных каналов, в связи с чем целесообразно использовать комбинированную ИНС, включающую сверточную нейронную сеть (CNN) и многослойный перцептрон (MLP). В качестве входных данных для CNN используются квадраты модулей выходных сигналов адаптированных приемных каналов. CNN состоит из двух сверточных слоев и слоя формирования признаков, выход которого объединяется с входными сигналами условий наблюдения и подается на вход MLP. Многослойный перцептрон содержит два скрытых слоя с функцией активации ReLU и линейный выходной слой. Архитектура ИНС-измерителя угловых координат приведена ниже в виде фрагмента кода PyTorch.

```
Jaz, Jel=5, 5
class CNN_MLP(nn.Module):
    def __init__(self, Jaz, Jel):
        super(CNN_MLP, self).__init__()
        self.conv1=nn.Conv2d(1,16,3,padding=1)
        self.conv2=nn.Conv2d(16,32,3,padding=1)
        self.fc_cnn=nn.Linear(32*Jaz*Jel,128)
        self.fc_mlp1=nn.Linear(128+3,64)
        self.fc_mlp2=nn.Linear(64,32)
        self.fc_out=nn.Linear(32,2)
    def forward(self, x_img, x_aux):
        x=torch.relu(self.conv1(x_img))
        x=torch.relu(self.conv2(x))
        x=x.view(x.size(0), -1)
        x=torch.relu(self.fc_cnn(x))
        z=torch.cat([x, x_aux], dim=1)
        z=torch.relu(self.fc_mlp1(z))
        z=torch.relu(self.fc_mlp2(z))
        return self.fc_out(z)
```

Рис. 2. Архитектура ИНС-измерителя УК

Структура радиолокатора с предварительным ЦДО и использованием ИНС в качестве измерителя угловых координат показана на рис. 3.

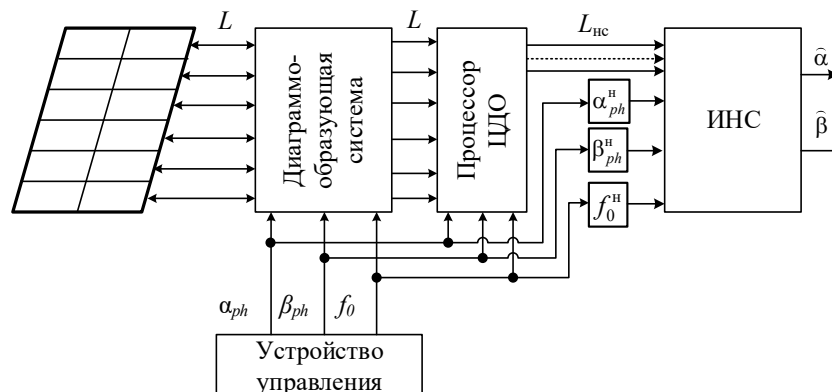


Рис. 3. Структурная схема радиолокатора с ЦДО и ИНС-измерителем угловых координат

Апертура АР разделяется на L ПР, выходные сигналы которых поступают в многоканальную приемную систему. Указанные сигналы в виде вектора комплексных амплитуд подаются на первый функциональный блок, реализующий диаграммообразование. Диаграммообразующая система

осуществляет первичную пространственную обработку путем весового суммирования сигналов ПР для формирования парциальных каналов для виртуального сканирования, и затем сформированные сигналы поступают в процессор цифрового диаграммообразования. Процессор ЦДО реализует алгоритм виртуального сканирования заданной области в пределах ГЛ ДН АР. В этом блоке для каждого дискретного направления α_i , β_j и условий наблюдения \mathbf{p} вычисляется $Z_{i,j}$ с последующей нормировкой $\bar{Z}_{i,j}$, что обеспечивает благоприятные условия для обработки в ИНС. Нормированные сигналы в виде вектора размерностью $L_{\text{нс}}$ поступают на вход ИНС. Параллельно в системе функционирует устройство управления, которое передает в процессор ЦДО и на вход ИНС параметры вектора условий наблюдения \mathbf{p} . Выходными сигналами системы являются абсолютные угловые отклонения ε_α , ε_β .

Заключение

Представленный вариант построения пеленгатора ориентирован на использование в современных радиолокационных станциях с ЦФАР, предъявляющих повышенные требования к точности угловых измерений и адаптивности в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. Направление дальнейших исследований предполагает проведение экспериментальной проверки разработанного подхода, а также поиск путей сокращения вычислительных затрат за счет оптимизации архитектуры нейронной сети без потери заданной точности оценки угловых координат.

Список использованных источников

1. Григорьев, Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010, – 144 с.
2. Ратынский, М.В., Порсев В.И. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР / Под ред. В.И. Порсева. – М.: Радиотехника, 2019. – 160 с.
3. Козлов, С. В. Пеленгационные антенные системы с пространственной компенсацией помех : учеб.-метод. пособие / С. В. Козлов. – Минск : БГУИР, 2019. – 158 с.
4. Морозова, Е.О. Нейросетевая обработка сигналов моноимпульсной локации / Е.О. Морозова, П.Е. Овчинников, М.Ю. Семенова // Вестн. Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. 2013. № 6. С. 62–66.
5. Козлов, С.В. Обработка сигналов малоэлементного моноимпульсного пеленгатора в условиях мощных помех с использованием искусственных нейронных сетей / С.В. Козлов // Доклады БГУИР, № 5, 2018. – С. 31-37.
6. Семенов, Л. М. Алгоритм моноимпульсного измерения углового положения летательного аппарата с помощью искусственной нейронной сети / Л. М. Семенов, Л. Б. Фридман // Ural Radio Engineering Journal, № 7, 2023.– С. 291–303. DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.004.
7. 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.
8. Ле В.К. Выбор параметров реализации и свойства адаптивных максимально-правдоподобных алгоритмов оценивания угловых координат цели в радиолокационном измерителе с многоканальной приемной системой / С. В. Козлов, Ле Ван Кыонг // Наука и военная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 42–46.