

УДК 621.396

## ВАРИАНТ ПОСТРОЕНИЯ СУММАРНО-РАЗНОСТНОГО ПЕЛЕНГАТОРА НА БАЗЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПОДРЕШЕТКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Зайцев И.А.<sup>1</sup>, аспирант, Кривицкий П. Д.<sup>1</sup>, студент гр. 241201

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – д-р техн. наук, проф.

**Аннотация.** Предложен вариант суммарно-разностного пеленгатора на базе антенной решетки с подрешетками, в котором для коррекции систематических ошибок, вызванных угловым сканированием по азимуту и углу места и амплитудно-фазочастотными неидентичностями приемных каналов, используется многослойный перцептрон. Нейросетевой метод заменяет традиционные многомерные калибровочные таблицы, переносит процедуру калибровки на этап обучения и обеспечивая универсальность при работе в широком диапазоне частот и углов сканирования.

**Ключевые слова.** антенная решетка, подрешетка, суммарно-разностный пеленгатор, искусственная нейронная сеть, многослойный перцептрон, амплитудно-фазочастотные неидентичности, коррекция систематических ошибок, угловые координаты.

Современные радиолокационные станции (РЛС) предъявляют все более высокие требования к точности измерения угловых координат (УК) воздушных объектов. Это обусловлено необходимостью эффективного решения задач обнаружения, сопровождения и классификации целей в условиях усложняющейся радиоэлектронной обстановки. Традиционным и наиболее распространенным методом определения УК в радиолокации является моноимпульсный метод пеленгации, который позволяет получить информацию об угловом положении цели по одному принятому импульсу [1].

В зависимости от способа формирования пеленгационной характеристики различают амплитудный и фазовый методы моноимпульсной пеленгации. Наиболее распространенный амплитудный суммарно-разностный метод [1] основан на формировании суммарного и разностных лучей непосредственно из сигналов элементов или подрешеток фазированной антенной решетки (ФАР). Преимуществом данного метода является инвариантность к флуктуациям амплитуды принимаемого сигнала, поскольку определение УК базируется не на абсолютных значениях уровней, а на соотношении сигналов в суммарном и разностном каналах.

Однако метод имеет недостатки, среди которых является нелинейность дискриминационной характеристики за пределами узкой центральной области, что ограничивает диапазон однозначного и точного измерения координат. Кроме того, точность пеленгации критически зависит от идентичности приемных каналов. Любое различие в коэффициентах передачи или амплитудно-фазочастотная неидентичность (АФЧН) неизбежно ведет к смещению пеленгационной характеристики и появлению систематических ошибок.

В последние годы в различных областях радиотехники активно развиваются методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей (ИНС). Нейросетевые подходы применяются для решения задач обнаружения, распознавания и обработки радиолокационных сигналов. Нейронные сети обладают способностью к выявлению скрытых закономерностей и естественным вычислительным параллелизмом [5], что делает их перспективным инструментом для обработки сигналов в многоканальных приемных системах.

Актуальность рассматриваемого направления подтверждается многочисленными публикациями, посвященным применению искусственных нейронных сетей для измерения УК, а также исследованию различных архитектур ИНС [1-7]. Общим для рассматриваемых подходов является использование ИНС как универсального аппроксиматора, осуществляющего обработку сигналов.

Целью настоящей работы является разработка варианта построения суммарно-разностного пеленгатора с использованием ИНС, обеспечивающего повышение точности измерения УК за счет коррекции систематических ошибок, обусловленных как шумовыми воздействиями, так и неидеальностью приемных трактов.

### 1) Амплитудный суммарно-разностный пеленгатор

2)

Рассмотрим моноимпульсный радиолокационный пеленгатор, реализованный на основе цифровой фазированной антенной решетки (ЦФАР). Антенная решетка имеет иерархическую структуру, параметры которой определяются исходя из средней несущей частоты, например,  $f_0 = 10$  ГГц при длине волны  $\lambda = c/f_0$ . Для предотвращения появления побочных главных максимумов в диаграмме направленности расстояние между излучателями выбирается равным половине длины волны  $\lambda/2$ .

Антенная система состоит из подрешеток, организованных в прямоугольную структуру: пусть, для определенности, по оси  $Oy$  (азимуту) расположено 6 элементов в подрешетке ( $N_y^{\text{под}} = 6$ ), а по оси  $Oz$  (углу места) – 4 элемента ( $N_z^{\text{под}} = 4$ ). При этом сама антенная решетка формируется из  $N_y^{\text{ан}} = 6$  подрешеток по азимуту и  $N_z^{\text{ан}} = 4$  подрешеток по углу места, что в сумме дает  $N = 24$  подрешетки. В результате физические размеры антенной системы составляют  $6 \cdot 6 \cdot (\lambda/2) = 18\lambda$  по азимуту и  $4 \cdot 4 \cdot (\lambda/2) = 8\lambda$  по углу места.

После определения геометрии решетки оцениваются ее направленные свойства. Величиной, которая определяет потенциальную точность измерения УК, является ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Для всей антенной решетки ширина луча по азимуту  $\Delta\alpha$  и углу места  $\Delta\beta$  в градусах вычисляется по формулам

$$\Delta\alpha = 51 \cdot \lambda / (N_y^{\text{ан}} \cdot N_y^{\text{под}} \cdot d) \text{ и } \Delta\beta = 51 \cdot \lambda / (N_z^{\text{ан}} \cdot N_z^{\text{под}} \cdot d).$$

Аналогичным образом определяются параметры парциальных лучей подрешеток:

$$\Delta\alpha^{\text{под}} = 51 \cdot \lambda / (N_y^{\text{под}} \cdot d) \text{ и } \Delta\beta^{\text{под}} = 51 \cdot \lambda / (N_z^{\text{под}} \cdot d).$$

Данные лучи шире основного луча всей решетки пропорционально уменьшению апертуры подрешетки.

Процесс пеленгации суммарно-разностным методом реализуется через формирование сигналов суммарного  $\dot{Y}_\Sigma$  и разностных  $\dot{Y}_{\Delta\alpha}$ ,  $\dot{Y}_{\Delta\beta}$  каналов по азимуту и углу места на выходе тракта первичной обработки радиолокатора. Для антенной решетки на базе подрешетки сигналы примут вид

$$\dot{Y}_\Sigma(t) = y(t)\omega_\Sigma^*; \quad \dot{Y}_{\Delta\alpha}(t) = y(t)\omega_{\Delta\alpha}^*; \quad \dot{Y}_{\Delta\beta}(t) = y(t)\omega_{\Delta\beta}^*,$$

где  $y(t) = (\dot{Y}_1(t), \dots, \dot{Y}_L(t))$  – вектор выходных сигналов  $l = \overline{1, L}$  на выходах подрешеток АР;  $\omega_\Sigma$ ,  $\omega_{\Delta\alpha}$ ,  $\omega_{\Delta\beta}$  – векторы весовых коэффициентов (ВВК) сигналов суммарного, разностного по азимуту и углу места каналов, которые в свою очередь определяются как:

$$\begin{aligned} \omega_\Sigma &= \sum_{i=1}^4 b_i^\Sigma f(\alpha_{ph} + b_i^{\Delta\alpha} \gamma \Delta\alpha, \beta_{ph} + b_i^{\Delta\beta} \gamma \Delta\beta, \alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0); \\ \omega_{\Delta\alpha} &= \sum_{i=1}^4 b_i^{\Delta\alpha} f(\alpha_{ph} + b_i^{\Delta\alpha} \gamma \Delta\alpha, \beta_{ph} + b_i^{\Delta\beta} \gamma \Delta\beta, \alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0); \\ \omega_{\Delta\beta} &= \sum_{i=1}^4 b_i^{\Delta\beta} f(\alpha_{ph} + b_i^{\Delta\alpha} \gamma \Delta\alpha, \beta_{ph} + b_i^{\Delta\beta} \gamma \Delta\beta, \alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0). \end{aligned}$$

В формулах для ВВК  $f(\alpha, \beta) = (\dot{F}_1(\alpha, \beta), \dots, \dot{F}_L(\alpha, \beta), \alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0)$  – вектор ДН подрешеток;  $(\alpha_{ph}, \beta_{ph})$  – направление наблюдения (направление фазирования подрешеток);  $\gamma$  – относительный сдвиг ДН парциальных каналов;  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  – ширина главного лепестка ДН суммарного канала по азимуту и углу места;  $f_0$  – несущая частота. Также в формулах используются весовые коэффициенты  $b^\Sigma$ ,  $b^{\Delta\alpha}$  и  $b^{\Delta\beta}$ , каждый из которых представлен вектором из четырех элементов, что указывает на разделение системы на четыре квадранта для моноимпульсной обработки. Суммарный канал формируется с вектором весов  $b^\Sigma = [1, 1, 1, 1]$ . Это соответствует синфазному сложению сигналов от всех частей апертуры, создавая максимум ДН в равносигнальном направлении. Разностный канал по азимуту формируется с вектором весов  $b^{\Delta\alpha} = [1, -1, -1, 1]$ . Данная комбинация знаков реализует операцию вычитания сигналов одной половины антенны из другой в горизонтальной плоскости, обеспечивая нуль в равносигнальном направлении и создает чувствительность к отклонениям цели по азимуту. Разностный канал по углу места формируется с вектором весов  $b^{\Delta\beta} = [1, 1, -1, -1]$ , что аналогичным образом создает чувствительность к отклонениям цели по углу места.

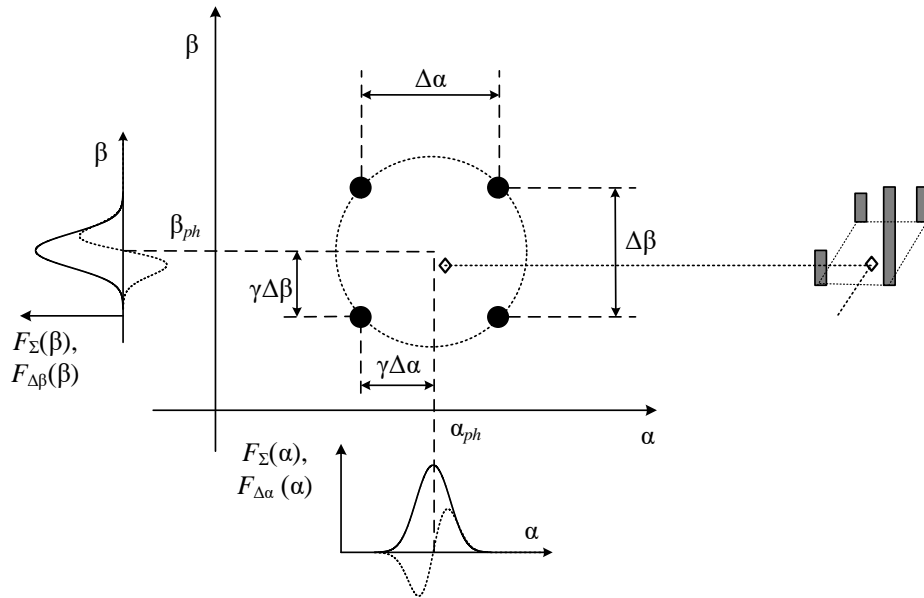


Рисунок 1 – Формирование сигналов приемных каналов

После формирования сигналов суммарного и разностных каналов и их согласованной фильтрации вычисляется оценка УК цели по азимуту и углу места:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{\mu_{\alpha}} \frac{\text{Re}\{\dot{Y}_{\Sigma}(t)Y_{\Delta\alpha}^*(t)\}}{\dot{Y}_{\Sigma}(t)Y_{\Sigma}^*(t)}; \hat{\beta} = \frac{1}{\mu_{\beta}} \frac{\text{Re}\{\dot{Y}_{\Sigma}(t)Y_{\Delta\beta}^*(t)\}}{\dot{Y}_{\Sigma}(t)Y_{\Sigma}^*(t)},$$

где  $\mu_{\alpha(\beta)}$  – крутизна дискриминационной характеристики по соответствующей координате, которая и

вычисляется по формуле  $\mu_{\alpha(\beta)} = \frac{1,5 \cdot \cos \alpha_{ph}(\beta_{ph})}{\Delta\alpha(\Delta\beta)}$ .

Из формул для векторов весовых коэффициентов сигналов суммарного, разностных каналов и вектора ДН подрешеток следует, что оценки УК зависят от направления фазирования подрешеток и несущей частоты. Назовем эту зависимость вектором условий наблюдения  $p = (\alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0)$ .

В реальных условиях функционирования из-за амплитудно-фазочастотных неидентичностей приемных каналов (АФЧН), зависящих от частоты и изменений параметров трактов для различных направлений сканирования, определяемых дискретностью фазовращателей и аттенуаторов подрешеток, возникают смещения нулей и изменения крутизны пеленгационных характеристик суммарно-разностной системы, поэтому после получения оценок азимута и угла места их необходимо скорректировать по правилу

$$\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} + \delta\alpha(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, p); \tilde{\beta} = \hat{\beta} + \delta\beta(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, p),$$

где  $\delta\alpha(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, p)$  и  $\delta\beta(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, p)$  – калибровочная функция (на практике – поправочная таблица).

Техническая реализация введения поправок требует запоминания больших поправочных таблиц, формируемых на этапе измерения характеристик радиолокатора. Такие измерения выполняются, например, в безэховой камере или на радиотехническом полигоне, где осуществляется «обнос» эталонного источника отраженного сигнала в заданном угловом секторе для всех условий наблюдения (направлений фазирования и значений несущей частоты).

Использование ИНС в архитектуре пеленгатора позволит реализовать введение поправочных калибровочных коэффициентов непосредственно на этапе обучения, что упрощает техническую реализацию пеленгатора за счет отказа от хранения больших поправочных таблиц.

В процессе первичного анализа описанных выражений для классического суммарно-разностного алгоритма без компенсации помех выявлено, что входной вектор сигналов ИНС должен включать в себя сигналы суммарного  $\dot{Y}_{\Sigma}$  и разностных  $\dot{Y}_{\Delta\alpha}, \dot{Y}_{\Delta\beta}$  каналов и параметры  $\alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0$  условий наблюдения.

Однако для оптимизации входных данных для ИНС целесообразно произвести нормировку в части сигналов вида:

$$\dot{Y}_{\Delta\alpha}^H = \frac{\dot{Y}_{\Delta\alpha}}{\dot{Y}_{\Sigma}} = |\dot{Y}_{\Delta\alpha}^H| e^{j2\pi\psi_{\Delta\alpha}^H}; \psi_{\Delta\alpha}^H = \frac{\arg \dot{Y}_{\Delta\alpha}^H}{2\pi};$$

$$\dot{Y}_{\Delta\beta}^H = \frac{\dot{Y}_{\Delta\beta}}{\dot{Y}_{\Sigma}} = |\dot{Y}_{\Delta\beta}^H| e^{j2\pi\psi_{\Delta\beta}^H}; \psi_{\Delta\beta}^H = \frac{\arg \dot{Y}_{\Delta\beta}^H}{2\pi}.$$

При этом выполняется условие  $0 \leq \psi_{\Delta\alpha(\beta)}^H \leq 1$ , и при наличии отраженного сигнала в условиях высокого отношения сигнал/шум ( $SNR \gg 1$ ) с высокой вероятностью имеем  $|\dot{Y}_{\Delta\alpha(\beta)}^H| < 1$ . Применение такой нормировки позволяет исключить сигнал  $\dot{Y}_{\Sigma}$  из входного набора и использовать только нормированные амплитуды и фазы сигналов разностных каналов.

Для условия наблюдения  $\rho = (\alpha_{ph}, \beta_{ph}, f_0)$  целесообразно также выполнить нормировку к диапазону  $[0; 1]$  следующим образом:

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

где  $\alpha(\beta)_{\max}, \alpha(\beta)_{\min}$  – максимальный и минимальный угол наблюдения по азимуту (углу места) соответственно;  $f_{\max}, f_{\min}$  – максимальная и минимальная несущие частоты.

В результате нормировок все входные величины, за исключением амплитуд сигналов разностных каналов, лежат в интервале  $[0; 1]$ .

Таким образом, ИНС-измеритель УК для суммарно-разностной схемы должна иметь 7 действительных входных сигнала: четыре сигнала от нормированных разностных каналов (две амплитуды и две фазы) и три нормированных сигнала от условий наблюдения. Ожидаемыми выходами ИНС являются абсолютные угловые отклонения (в радианах) отраженного сигнала относительно направления наблюдения, вычисляемые по формулам:

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

где  $\alpha, \beta$  – истинные значения азимута и угла места полезного сигнала. При типовых значениях ширины главного лепестка ДН АР радиолокатора по азимуту и углу места  $(1...10)^\circ$  абсолютное значение величин  $\varepsilon_{\alpha}, \varepsilon_{\beta}$  будет заведомо меньше 1.

### Искусственная нейронная сеть для измерения угловых координат

В предлагаемом варианте пеленгатора на базе ИНС с суммарно-разностными каналами пространственные данные в явном виде отсутствуют, что обусловило применение многослойного перцептрона (MLP) с действительными входными сигналами. Входной слой содержит 7 нейронов. Количество скрытых слоев и число нейронов в них определяются требуемым объемом запоминаемой информации и подбираются экспериментально. Для рассматриваемых параметров радиолокатора использовано 3 скрытых слоя с функциями активации *ReLU*; число нейронов в первом скрытом слое составляет  $K=256$  и уменьшается в два раза от слоя к слою. Выходной линейный слой содержит два нейрона, соответствующих оценкам азимута и угла места цели. Архитектура ИНС-измерителя УК представлена ниже в виде кода PyTorch.

```
class DeepMLP(nn.Module):
    def __init__(self, input_dim):
        super(DeepMLP, self).__init__()
        self.net = nn.Sequential(
            nn.Linear(input_dim, K),
            nn.ReLU(),
            nn.Linear(K, K // 2),
            nn.ReLU(),
            nn.Linear(K // 2, K // 4),
            nn.ReLU(),
            nn.Linear(K // 4, K // 8),
            nn.ReLU(),
            nn.Linear(K // 8, 2))
    def forward(self, x):
        return self.net(x)
```

Рисунок 2 – Архитектура искусственной нейронной сети в качестве измерителя угловых координат

На основании изложенного предлагается использовать следующую структуру пеленгатора с суммарно-разностной обработкой, изображенной на рисунке 3.

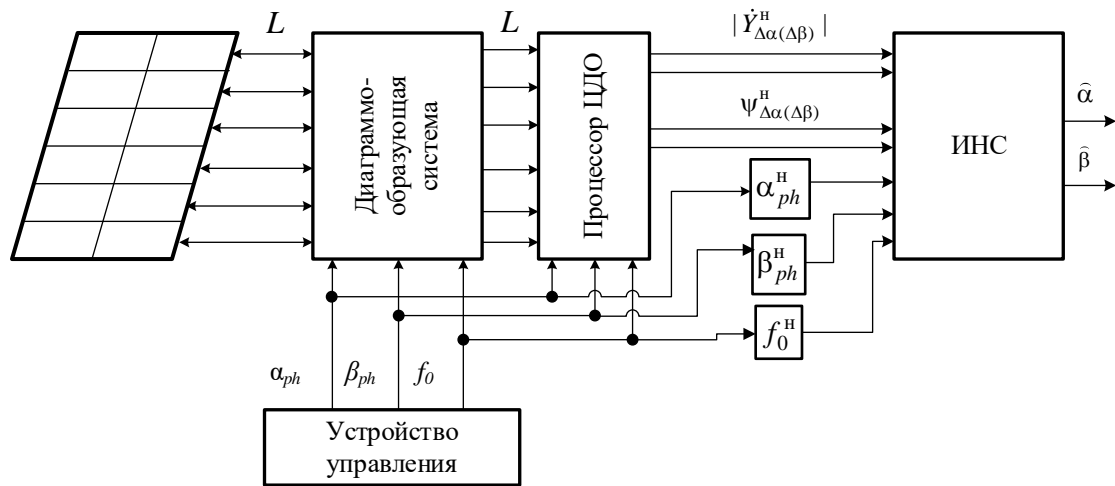


Рисунок 3 – Структурная схема пеленгатора с суммарно-разностной обработкой и ИНС – измерителем УК

Апертура антенны разделена на  $L$  идентичных подрешеток, сигналы с выходов которых поступают на многоканальную приемную систему. Выходные сигналы этих подрешеток, представленные в виде вектора комплексных амплитуд  $\mathbf{y}(t)$ , поступают на первый функциональный блок, представляющий собой диаграммообразующую систему. В этой схеме осуществляется управление фазовращателями и аттенюаторами подрешеток для их фокусировки в заданное направление наблюдения по азимуту и углу места. Далее сформированные сигналы поступают на процессор цифрового диаграммообразования (ЦДО), который формирует сигналы суммарного, разностного азимутального и разностного угломестного каналов и выполняет функцию подготовки входных данных для измерителя УК. В процессоре выполняется нормировка сигналов разностных каналов к суммарному. Полученные таким образом четыре параметра (две нормированные амплитуды и две фазы разностных каналов) составляют часть входного вектора признаков для измерителя на базе ИНС. Параллельно с обработкой сигналов в системе функционирует устройство управления, которое обеспечивает передачу параметров условий наблюдения в процессор ЦДО для их нормировки. Поскольку вектор ДН подрешеток и ВВК основных моноимпульсных приемных каналов зависят от углов фазирования и несущей частоты, эти параметры должны учитываться при вычислении оценки координат. Они формируют оставшуюся часть вектора признаков на входе ИНС. Выходными сигналами нейросетевого измерителя являются абсолютные угловые отклонения отраженного сигнала от направления фазирования.

### Заключение

Разработанный вариант суммарно-разностного пеленгатора с использованием искусственной нейронной сети обеспечивает коррекцию систематических ошибок, обусловленных нелинейностью дискриминационной характеристики и неидентичностью приемных каналов, упрощает техническую реализацию за счет переноса процедуры калибровки на этап обучения нейронной сети, что исключает необходимость хранения и поиска поправок в многомерных таблицах, а также обеспечивает универсальность при работе в различных направлениях наблюдений и на различных несущих частотах.

Предложенное решение может найти применение в современных радиолокационных станциях с цифровыми фазированными антенными решетками, где требования к точности измерения УК и адаптивности к изменяющимся условиям функционирования являются критическими.

Дальнейшие исследования предполагается направить на экспериментальную проверку разработанного подхода путем создания его модели и обучения ИНС, а также на оптимизацию архитектуры нейронной сети для минимизации вычислительных затрат при сохранении требуемой точности измерений.

#### Список использованных источников:

1. Ратынский, М.В., Порсеев В.И. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР / Под ред. В.И. Порсеева. – М.: Радиотехника, 2019. – 160 с.
2. Татузов, А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. – М.: Радиотехника, 2009. – 432 с.
3. Богословская, М.А. Применение нейронных сетей в задачах пеленгации радиолокационных целей / М.А. Богословская, К.Ю. Гаврилов // Инф.-аналит. журнал «Фазотрон». 2007. № 3–4.
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 малозлементного моноимпульсного пеленгатора в условиях мощных помех с использованием искусственных нейронных сетей / С.В. Козлов // Доклады БГУИР, № 5, 2018. – С. 31–37.

62-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2026 г.

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 УК радиолокационных целей в цифровой антенной решетке / Н.В. Шацкий // *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2022, Том 16, №7. – С. 4-13.

UDC 621.396

## DESIGN VARIANT OF SUM-DIFFERENCE RADAR BASED ON ANTENNA ARRAY WITH SUBARRAYS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

*Zaitsev I.<sup>1</sup>, Krivitsky P.<sup>1</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Kozlov S. – Dr. Sci. (Tech.), Professor*

**Annotation.** A variant of a sum-difference direction finder based on an antenna array with subarrays is proposed, in which a multilayer perceptron is used to correct systematic errors caused by amplitude-phase-frequency non-identities of the receiving channels. The neural network method replaces traditional multidimensional calibration tables, moving the calibration procedure to the training stage and ensuring versatility when operating over a wide range of frequencies and scanning angles.

**Keywords.** antenna array, subarray, sum-difference radar, artificial neural network, multilayer perceptron, amplitude-phase-frequency non-identities, systematic error correction, angular coordinates.