

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.96

Нехайчик  
Артур Дмитриевич

Нейросетевые алгоритмы функционирования моноимпульсных пеленгаторов с  
пространственной компенсацией помех

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии»

---

Научный руководитель

Козлов Сергей Вячеславович

Доктор технических наук, доцент

Минск 2018

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования — малоэлементный моноимпульсный пеленгатор.

Предмет исследования — нейросетевой алгоритм функционирования моноимпульсных пеленгаторов в условиях мощных помех.

Целью диссертационного исследования является обоснование нейросетевого алгоритма в моноимпульсном пеленгаторе в условиях интенсивных помех.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ особенностей обработки сигналов малоэлементного моноимпульсного пеленгатора с использованием искусственных нейронных сетей.
2. Определение архитектуры искусственной нейросети и алгоритмов её обучения.
3. Реализация нейросетевого алгоритма функционирования моноимпульсного пеленгатора в условиях мощных помех.
4. Исследование эффективности функционирования нейросетевого алгоритма и его сравнение с оптимальными статистическими алгоритмами обработки сигналов моноимпульсных пеленгаторов.

В процессе диссертационных исследований использовались методы теорий нейронных сетей, антенн, адаптивной линейной фильтрации, компьютерного моделирования и статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время нейросетевые технологии широко применяются в различных системах обработки данных. Одной из основных тенденций развития нейронных сетей является расширение области их применения и перечня решаемых задач при обработке сигналов в радиотехнических системах передачи и извлечения информации.

Одной из важнейших задач радиотехнической системы извлечения информации является определение угловых координат источников радиоизлучения. Эта задача характерна для средств радиолокации, навигации и радиомониторинга. Направление на источник радиоизлучения определяется путём сравнения амплитуд или фаз сигналов, принятых одновременно двумя или более приёмными каналами с различающимися диаграммами направленности. Для наиболее распространённого метода определения угловых координат основанно на вычислении отношения амплитуд  $E_1$ ,  $E_2$ , поступающих на различные приёмные каналы. Вычисление положения источника сводится к решению системы в общем случае нелинейных уравнений.

В значительном числе практически важных случаев наряду с полезным сигналом на входе многоканальной антенной системы присутствуют мощные помехи, воздействующие по боковым лепесткам диаграмм направленности приёмных каналов. Обеспечение высокой помехоустойчивости моноимпульсных пеленгаторов средств радиолокации и радиомониторинга достигается за счет внедрения оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки принимаемых сигналов. К их числу относятся алгоритмы пространственной компенсации помех, воздействующих по боковым и скатам главного лепестка диаграмм направленности основных каналов пеленгатора, и алгоритмы, реализующих современные методы «сверхразрешения» источников радиоизлучения.

К наиболее сложным следует отнести задачу обеспечения помехоустойчивости относительно малоэлементных антенных систем, в частности, квадрантной антенной системы, полученной разделением общей антенной решетки на четыре подрешетки или при использовании четырех идентичных независимых антенн. Существует алгоритм функционирования моноимпульсного пеленгатора на базе квадрантной антенной решетки, основанный на адаптивном управлении углом ориентации двух ограничений на значения диаграмм направленности адаптированных суммарного и разностного каналов, обеспечивающий компенсацию одного источника помех по боковым лепесткам диаграммы направленности. Однако практическая реализация таких алгоритмов затруднена высокими требованиями к быстрдействию вычислительных средств.

Весьма перспективным для моноимпульсной пеленгации является внедрение нейросетевых алгоритмов обработки сигналов, обладающих способно-

стью к выявлению скрытых закономерностей и естественным вычислительным параллелизмом. Рассматривался нейросетевой подход к обработке сигналов моноимпульсной локации, базирующийся на аппроксимации с использованием многослойного перцептрона пространственного распределения мощности источников радиоизлучения. Входными данными нейронной сети являлись измеренные мощности сигналов всех каналов антенной системы. Использование только амплитудной составляющей структуры сигналов, принимаемых элементами антенной системы, существенно ограничивает возможности алгоритма в условиях интенсивных помех.

В этой связи исследование возможности обработки сигналов малоэлементного моноимпульсного пеленгатора в условиях интенсивных помех по боковым лепесткам диаграммы направленности приемных каналов с использованием искусственных нейронных сетей является актуальным и практически значимым.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Показана возможность создания эффективных нейросетевых алгоритмов функционирования малоэлементных моноимпульсных пеленгаторов, обеспечивающих высокоточную пеленгацию полезных сигналов в условиях интенсивных помех по боковым лепесткам диаграмм направленности приёмных каналов;

2. Показано, что для обработки информации малоэлементного моноимпульсного пеленгатора может быть использована ИНС в виде многослойного перцептрона с сигмаидальными функциями активации в скрытых слоях и линейной функции активации в выходном слое; в качестве входной информации для ИНС целесообразно использование модулей и фаз элементов нормированной обратной корреляционной матрицы процессов на выходах приёмных каналов.

3. Получены количественные показатели, характеризующие эффективность обработки сигналов в малоэлементных моноимпульсных пеленгаторах с использованием предложенного нейросетевого алгоритма; установлено соответствие достигаемой эффективности с эффективностью статистически оптимальных алгоритмов.

Таким образом, целью диссертационного исследования является обоснование нейросетевого алгоритма в моноимпульсном пеленгаторе в условиях интенсивных помех.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, отмечается новизна, формулируется цель и задачи работы, кратко излагается содержание диссертации и основные научные результаты исследований.

В первой главе рассматриваются результаты обзора литературы по теме диссертации, определяются предмет исследования, обосновываются цели и задачи работы, определяется структура диссертации.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора рациональной структуры нейронной сети (рис. 1) и разработке математической модели формирования обучающей выборки для нейросетевого алгоритма функционирования моноимпульсного пеленгатора.

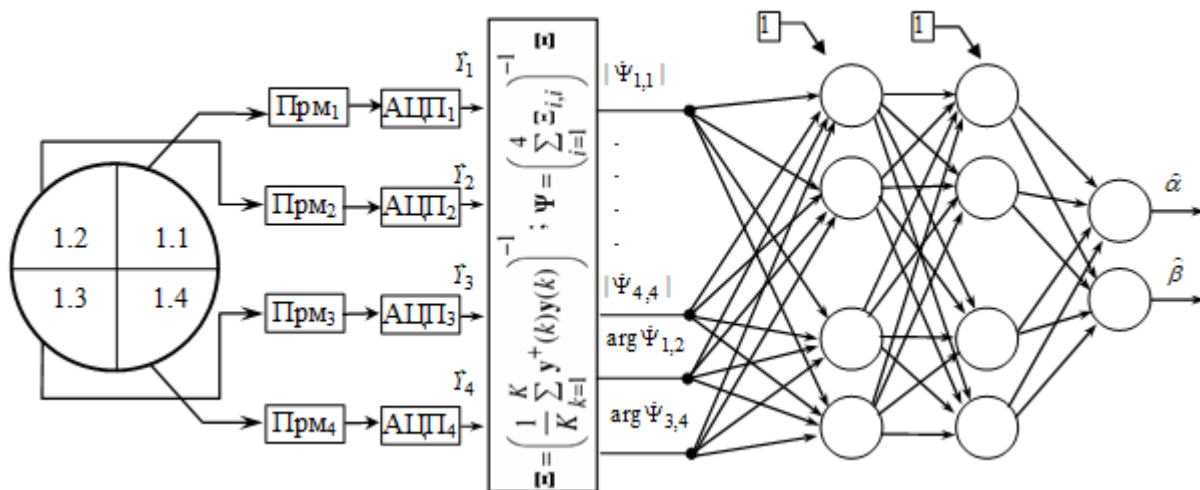


Рис. 1 – Структуры приемной системы и нейронной сети для оценки азимута и угла места источника полезного сигнала.

В качестве основы для формирования вектора входных сигналов нейросетевого алгоритма использовалась оценка обратной корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов. В качестве выходной информации принимаются оценки азимута  $\hat{\alpha} / \Delta\alpha_{0,5}$  и угла места  $\hat{\beta} / \Delta\beta_{0,5}$  источника излучения в пределах главного лепестка ДН парциальных каналов, нормированные к ширине главного лепестка ДН парциального канала.

Модель разработана в среде компьютерной математики *MathCad* и позволяет:

- рассчитывать угловые положения и мощности источников;
- рассчитывать корреляционную матрицу процессов;

визуализировать ДН парциального, суммарного и разностного каналов в азимутальной плоскости;

строить обучающую выборку для нейросетевого алгоритма и визуализировать результаты работы нейросети с полученной выборкой.

Блок-схема математической модели приведена на рисунке 2.

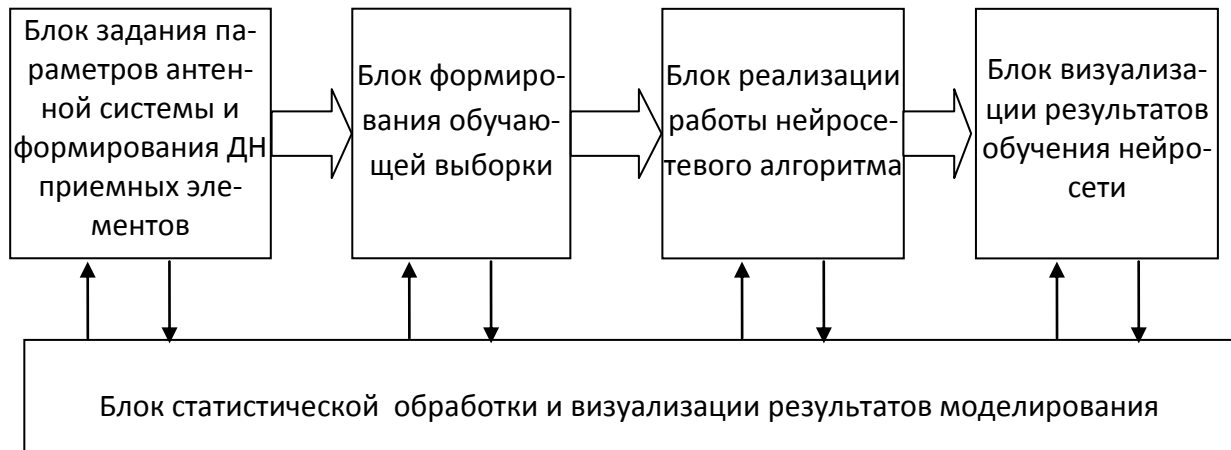


Рис. 2 - Блок-схема имитационной математической модели

В блоке задания параметров антенной системы и формирования ДН приемных элементов осуществляется расчет координат приемных элементов круглой антенной решетки и диаграмм направленности элементов.

В блоке формирования обучающей выборки осуществляется расчёт корреляционной матрицы процессов, нормировка элементов и обращение матрицы. На основе полученного результата формируется обучающая выборка для нейросети.

В блоке реализации работы нейросетевого алгоритма происходит обучение нейросети на базе полученной ранее тестовой выборки и рассчитывается оценка азимута и угла места источника полезного сигнала.

В блоке визуализации результатов обучения нейросети рассчитываются графики зависимости среднего квадрата ошибки от номера эпохи обучения и сравниваются значения истинного азимута источника полезного сигнала с его оценкой на выходе обученной нейросети для обучающей и тестовой выборки.

Полученные результаты могут быть выведены на экранные графики и в файл.

В третьей главе приведены результаты обучения нейронной сети для фиксированного и динамического положения источника помех. Основной целью исследования является проверка работоспособности выбранной архитектуры нейронной сети при наличии мощного источника помех с фиксированным и динамическим положением.

Рассматривалась НС включающая по 24 нейрона в двух скрытых слоях с полносвязной архитектурой. Для уменьшения времени обучения сети рассматривался только канал азимутального пеленгования, т.е. число выходных нейронов составляло один.

В обучающей выборке принималось:

угловые координаты источника полезного сигнала располагались в сетке по азимуту и углу места с шагом 0.5 градуса в пределах главного лепестка диаграммы направленности от  $-3$  градусов до 3 градусов (всего 169 положений источника полезного сигнала);

мощности источника полезного сигнала (на выходе изотропной приёмной антенны, нормированная к мощности внутренних шумов приёмного канала) составляли  $-10, 0, 10$  дБ;

мощности источника помех составляли 30, 40, 50 дБ;

угловое положение источника помех составляло 20 градусов по азимуту и 15 радусов по углу места.

На рисунке 4 представлена зависимость среднего квадрата ошибки от номера эпохи обучения. Процесс обучения носит неравномерный характер: вначале обучения уменьшается быстро. Далее выделяются этапы накопления информации внутри нейронной сети, когда ошибка уменьшается относительно медленно. После этапа накопления информации наблюдается резкое снижение ошибки с переходом к последующему этапу накопления информации. Длительности этапов составляют 20–60 эпох обучения.

На рисунке 5 истинные значения азимута источника полезного сигнала и его оценка на выходе НС сливаются в одну кривую, так как ошибка оценки очень мала.

Была реализована нейронная сеть для классификации сигнально-помеховой обстановки. Отличие структуры нейронной сети для оценки угла места и азимута источника полезного сигнала от структуры нейронной сети для классификации сигнально-помеховой обстановки (рис. 3) заключается в количестве нейронов в выходном слое и выходных данных. Количество выходных нейронов равняется четырём и в качестве выходной информации используются единица и ноль. Положительное значение на выходе первого нейрона свидетельствует об отсутствии источников полезного сигнала в области главного лепестка диаграммы направленности, на выходе второго нейрона – о наличии одного источника полезного сигнала, на выходе третьего – о наличии двух источников и на выходе четвёртого – о наличии трёх источников.

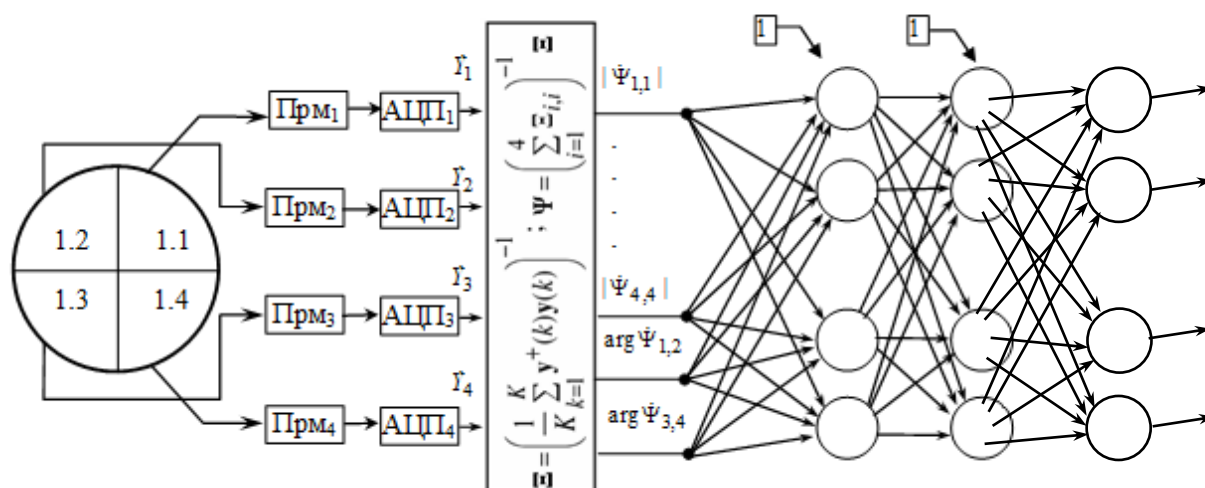


Рис. 3 – Структуры приемной системы и нейронной сети для классификации сигнально-помеховой обстановки

В таблице 1 приведены значения условных вероятностей  $W(i/j)$  принятия решения о наличии  $i$  источников излучения в пределах главного лепестка диаграммы направленности суммарного канала при условии воздействия  $j$  источников полезного сигнала в указанной области, а так же одного источника мощных помех по боковым лепесткам диаграммы направленности.

Таблица 1 – Условные вероятности правильных и неправильных решений при классификации сигнально-помеховых ситуаций

Истинное число источников полезных сигналов	Условные вероятности определения $j$ источников полезных сигналов			
	0	1	2	3
0	0,99	0,01	0	0
1	0	0,64	0,33	0,03
2	0	0,02	0,51	0,47
3	0	0,03	0,48	0,49



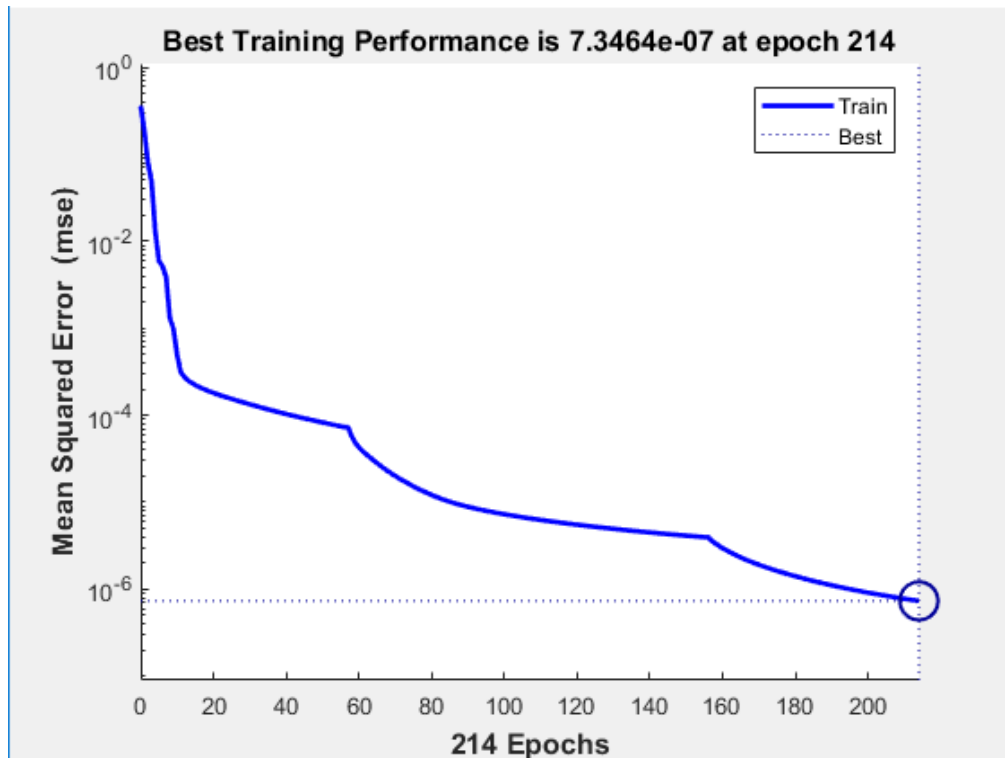


Рис. 4 – Зависимость среднего квадрата ошибки от номера эпохи обучения

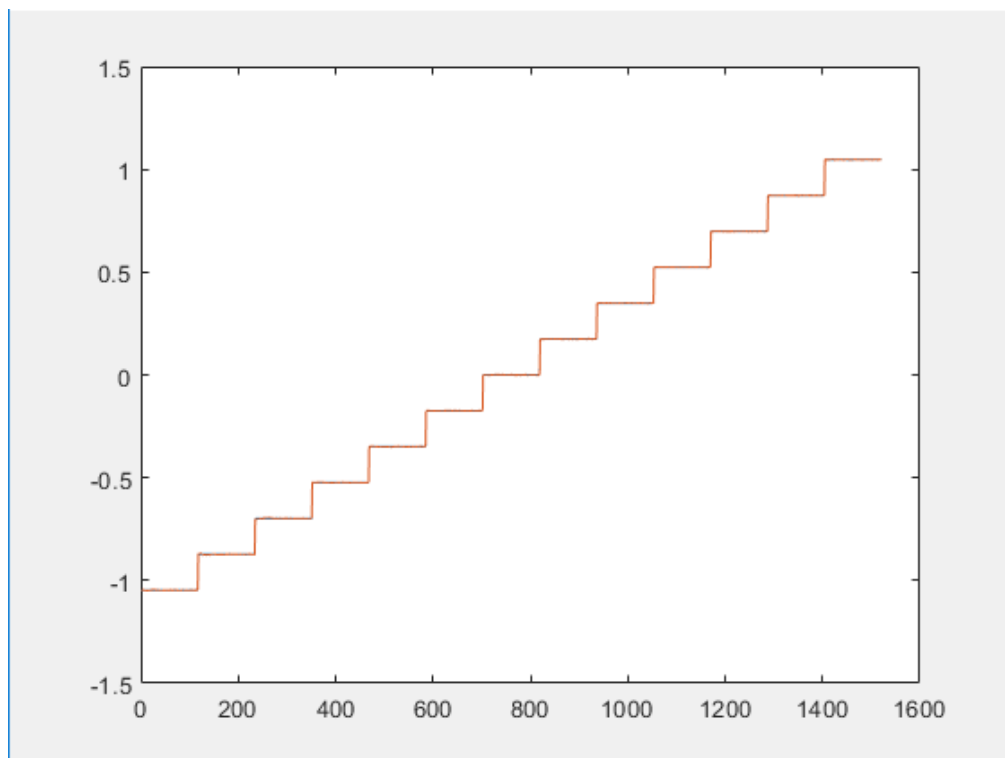


Рис. 5 – Значения истинного азимута источника полезного сигнала и его оценки на выходе обученной НС для обучающей выборки

Весьма примечательным является то обстоятельство, что работоспособность НС сохраняется при использовании двух нейронов в скрытых слоях. Средний квадрат ошибки при обучении по 200 эпохам обучения для указанного

случая составил  $7.4 \cdot 10^{-3}$ . Зависимости ошибки обучения приведены на рисунке 6.

Увеличение числа эпох до 5000 приводит к уменьшению среднего квадрата ошибки примерно в два раза. При дальнейшем увеличении числа эпох обучения ошибка не уменьшается.

Результаты работы нейросети для выборки, отличной от обучающей, (сплошная кривая – истинные значения азимута, пунктирная кривая – оценка азимута нейронной сетью) приведены на рисунке 7. Рисунок 7 соответствует плавному изменению азимута источника полезного сигнала (1000 точек) при угле места  $-1.5$  градуса, мощности полезного сигнала 0 дБ и мощности помехи 50 дБ.

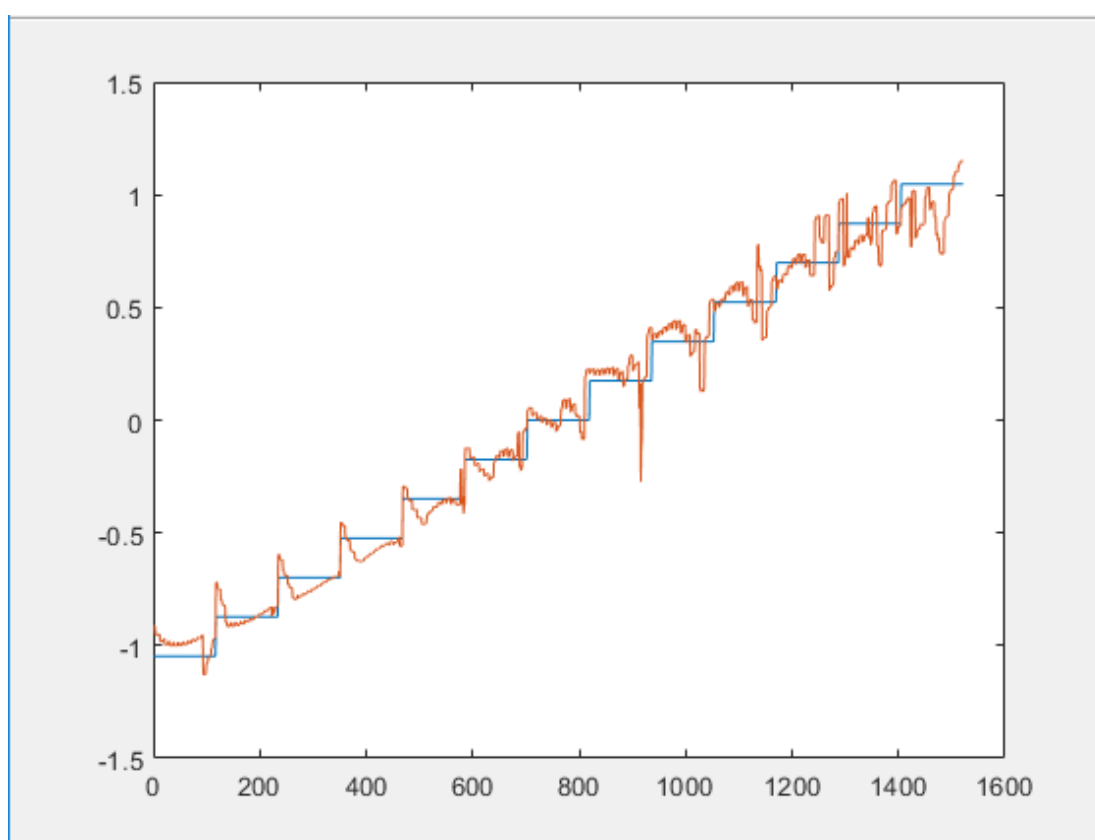


Рис. 6 – Значения истинного азимута источника полезного сигнала и его оценки на выходе обученной НС для обучающей выборки (2 нейрона в каждом скрытом слое)

Ошибка оценивания азимута не превышает 10% от ширины главного лепестка. Это свидетельствует о правильности определения нейронной сети и перечня входных сигналов для её функционирования в виде нормированных элементов корреляционной матрицы процессов на выходах приёмных каналов.

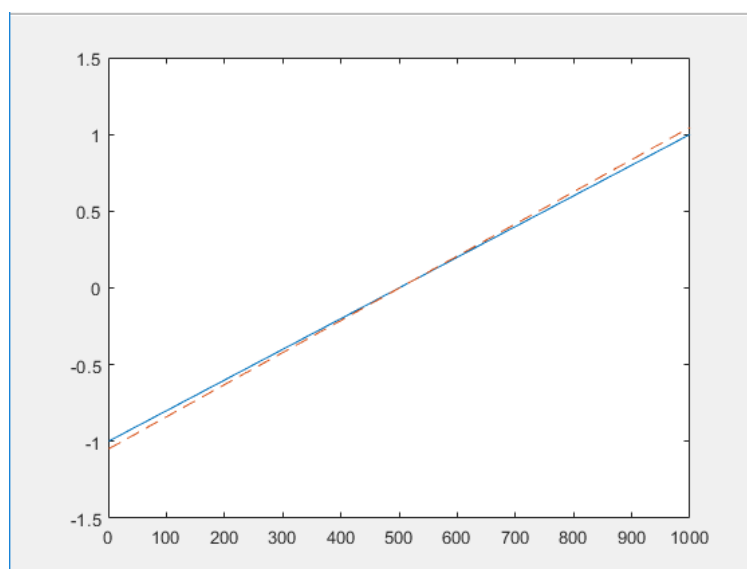


Рис. 7 – Значения истинного азимута источника полезного сигнала и его оценки на выходе обученной НС для тестовой выборки

Далее было проведено обучение нейронной сети для динамического положения источника помех. Принималось, что источник помех может занимать 16 положений по угловым координатам: 4 по азимуту и 4 по углу места с начальными значениями, аналогичными пункту 3.1 и шагом 0.5 градусов.

Результат обучения после 1000 эпох представлен на рисунке 8.

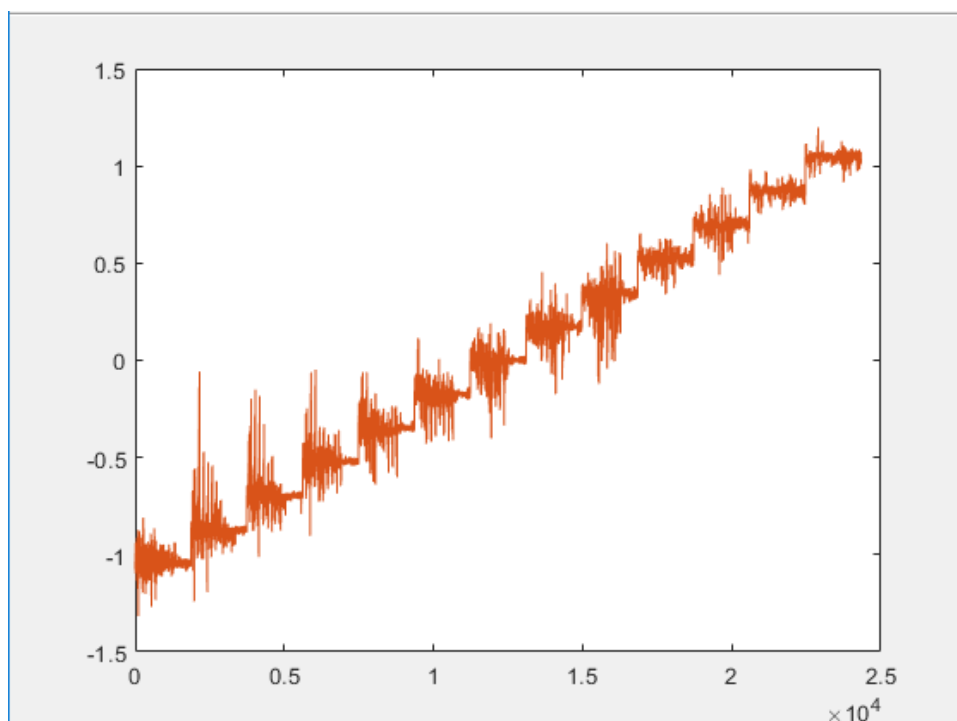


Рис. 8 – Значения истинного азимута источника полезного сигнала и его оценки на выходе обученной НС для тестовой выборки (1000 эпох)

В четвертой главе были разработаны рекомендации по практическому применению алгоритмов функционирования моноимпульсных пеленгаторов с пространственной компенсацией помех, что предполагает выделение этапов разработки алгоритма, определение количества используемых ПЛИС для реализации нейросетевых алгоритмов, определение возможностей элементной базы и области применения разработанного алгоритма.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационных исследований получены следующие основные результаты.

1. Обеспечение высокой помехоустойчивости моноимпульсных пеленгаторов средств радиолокации и радиомониторинга достигается за счет внедрения оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки принимаемых сигналов. К их числу относятся алгоритмы пространственной компенсации помех, воздействующих по боковым и скатам главного лепестка диаграмм направленности основных каналов пеленгатора, и алгоритмы, реализующих современные методы «сверхразрешения» источников радиоизлучения. К наиболее сложным следует отнести задачу обеспечения помехоустойчивости относительно малоэлементных антенных систем, в частности, квадрантной антенной системы, полученной разделением общей антенной решетки на четыре подрешетки или при использовании четырех идентичных независимых антенн. Практическая реализация такой задачи затруднена высокими требованиями к быстродействию вычислительных средств. В этой связи представляет интерес исследование возможности построения прямого, не аппроксимирующего известные статистические, нейросетевого алгоритма пеленгации полезных сигналов в моноимпульсном пеленгаторе на базе квадрантной антенной решетки в условиях интенсивных помех по боковым лепесткам ДН приемных каналов.

2. Обоснован алгоритм функционирования моноимпульсных пеленгаторов с пространственной компенсацией помех, отличающийся от существующих функционированием в условиях мощных внешних помех и разработана имитационная математическая модель для исследования эффективности работы нейросетевого алгоритма оценки азимута и угла места источника полезного сигнала.

3. Проведено исследование работоспособности нейросетевого алгоритма оценки азимута и угла места источника полезного сигнала на фоне мощных внешних помех. Выявлена зависимость влияния количества нейронов в каждом обучаемом слое нейронной сети, количества эпох обучения на точность работы нейросетевого алгоритма. Методом математического моделирования установлены следующие закономерности:

увеличение числа эпох обучения нейросети понижает значение среднего квадрата ошибки;

увеличение числа нейронов в обучаемом слое нейросети понижает предельный минимум значения среднего квадрата ошибки, который возможно достигнуть при обучении нейросети;

работоспособность нейросети сохраняется при изменении значений мощностей помех и источников сигнала и их начального положения по сравнению со значениями для создания обучающей выборки.

4. Разработаны рекомендации по практическому применению алгоритмов функционирования моноимпульсных пеленгаторов с пространственной компенсацией помех. Показано, что нейросетевой алгоритм классификации сигнално-помеховой обстановки и оценки азимута и угла места источника полезного сигнала может быть реализован с использованием современной элементной базы – быстродействующих синхронных квадратурных аналогоцифровых преобразователей и программируемых логических интегральных схем с производительностью порядка 1000 млн. операций комплексного умножения со сложением в секунду.

## СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Козлов С. В., Нехайчик А. Д. Вариант построения нейросетевого алгоритма функционирования радиолокационного моноимпульсного пеленгатора с пространственной компенсацией помех // Материалы 13-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (РТ -2017, г. Севастополь). С. 75.

2. Козлов С.В., Нехайчик А.Д. Нейросетевой алгоритм функционирования моноимпульсного пеленгатора на базе квадрантной антенной решетки // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17-19 апреля 2018 г.). В 5-и томах. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018, - том 3, С. 164-172.

3. Нехайчик А. Д. Нейросетевой алгоритм функционирования моноимпульсного пеленгатора на базе квадрантной антенной решетки // 54-я научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР (2018 г., г. Минск).