



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.11>

УДК: 621.396.96

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОБРАБОТКИ ИХ СПЕКТРОВ НА ВЫХОДЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ СХЕМЫ

М.О. Бердник

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 64

Статья поступила в редакцию 28 июля 2024 г.

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности применения нейросетевого подхода в задаче обнаружения сигналов с линейной частотной модуляцией на выходе автокорреляционной схемы. Полученные результаты демонстрируют существенное снижение количества ложных тревог по сравнению с традиционным способом, основанным на пороговой обработке.

**Ключевые слова:** радиолокация, линейная частотная модуляция, пороговая обработка, автокорреляционная схема, ложная тревога, нейронные сети, глубокое обучение,

**Автор для переписки:** Бердник Максим Олегович, [m.berdник@internet.ru](mailto:m.berdник@internet.ru)

### Введение

В современном мире государства, имеющие собственные космические системы дистанционного зондирования Земли, применяют их для обзора земной и морской поверхностей, в том числе на территории Российской Федерации (РФ). Среди них особое место занимают радиолокационные станции (РЛС)

космического базирования (КБ) вследствие их основного преимущества, состоящего во всепогодности и круглосуточности.

Для определения участков территории РФ, которые привлекают повышенное внимание операторов подобных систем, необходимо осуществлять прием и технический анализ сигналов РЛС КБ с использованием сети приемных устройств, расположенных на территории РФ.

## 1. Пороговая обработка

В основном, РЛС КБ функционируют в L, S, C, X диапазонах в импульсном режиме [1]. В данных системах в качестве зондирующих сигналов применяются последовательности широкополосных импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Параметры этих сигналов, такие как несущая частота  $f_H$  скорость и знак изменения частоты внутриимпульсной модуляции, длительность импульсов  $\tau_H$  и период их следования  $T$ , определяются конкретным режимом съемки. Пример временного представления импульсной последовательности с ЛЧМ при отношении сигнал/шум (ОСШ) 5 дБ приведен на рис. 1.

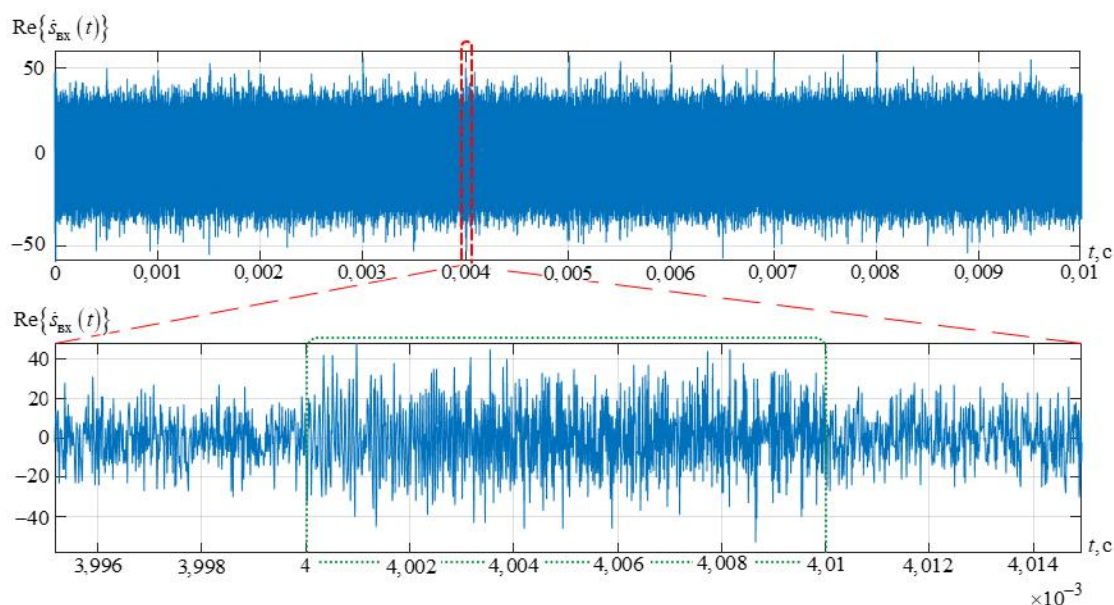


Рис. 1. Пример временного представления аддитивной смеси ЛЧМ-сигнала и гауссовской помехи (шума) при ОСШ 5 дБ.

Таким образом, задача обнаружения факта облучения приемного поста сводится к задаче обнаружения и оценки частотно-временных параметров последовательности ЛЧМ-импульсов. Оптимальный прием на фоне квазibelого шума (гауссовского шума с равномерной спектральной плотностью в пределах эффективной полосы частот сигнала) реализуется с помощью многоканального согласованного фильтра, т.е. линейного фильтра, импульсная характеристика которого является сопряженной с сигналом [2]. Однако, реализация такого подхода в условиях существенной априорной неопределенности параметров принимаемых ЛЧМ-импульсов сопряжена с высокими требованиями к вычислительной мощности устройства обработки. В такой ситуации одним из эффективных квазиоптимальных методов является реализация автокорреляционной схемы (рис. 2) [3]. Суть ее работы состоит в умножении принятой смеси сигнала и помехи на свою же копию, смещенную во времени на время задержки  $\tau_3$ , при выборе которого выполнены условия  $\tau_{\Pi} < \tau_3 \ll \tau_c$ , где  $\tau_{\Pi}$  и  $\tau_c$  – интервалы корреляции помехи и сигнала соответственно,  $\Delta f_{\text{УВЧ}} \approx 1/\tau_{\Pi}$  и  $f_{\text{ФНЧ}} \approx 1/\tau_c$ . Над результатом перемножения осуществляется операция интегрирования в течение временного интервала  $\tau_c$  (т. е. низкочастотная фильтрация).

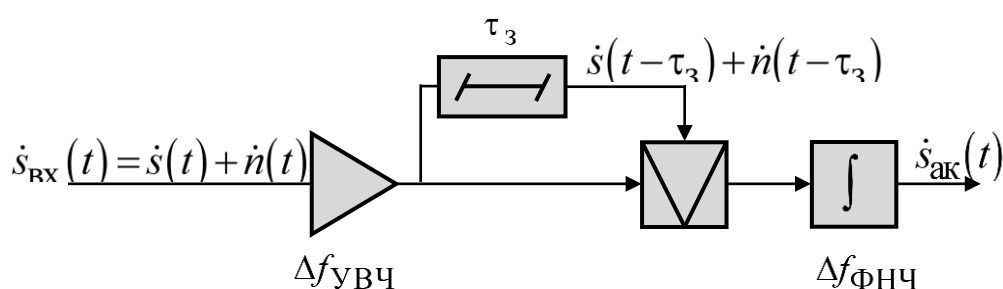


Рис. 2. Структурная схема реализации автокорреляционного приема.

Данная схема эффективна при ОСШ не менее минус 5 ... минус 3 дБ, и так как в большинстве практических случаев прием сигналов РЛС КБ осуществляется по главному лепестку (ГЛ) диаграммы направленности их антенны (ДНА) это условие выполняется, и применение автокорреляционной схемы в этой задаче является рациональным. В дополнение к этому

осуществляют накопление пачки ЛЧМ-импульсов, что также позволяет увеличить ОСШ на выходе автокорреляционной схемы.

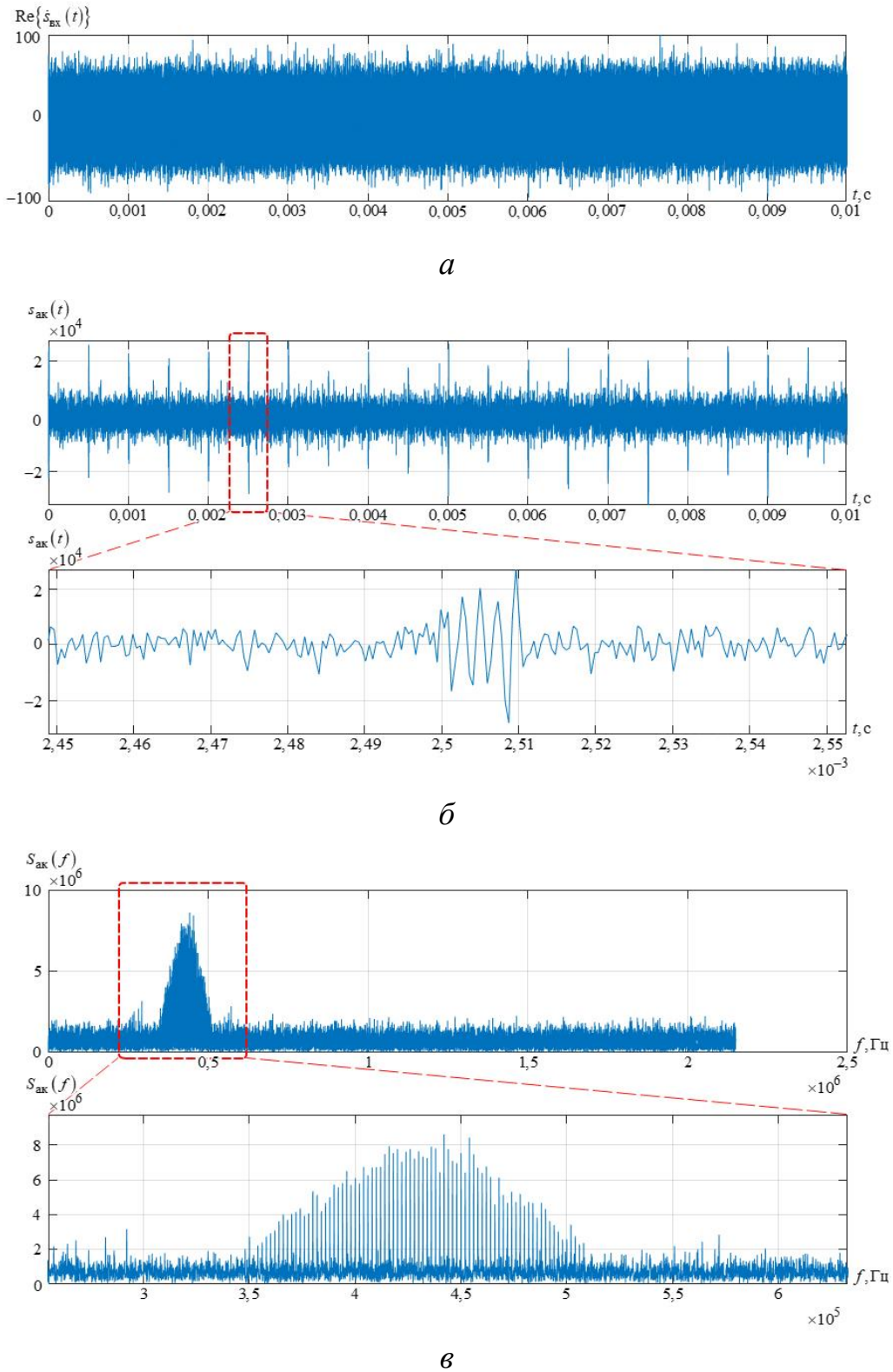


Рис. 3. Аддитивная смесь сигнала и гауссовской помехи на различных этапах автокорреляционной обработки при ОСШ 0 дБ.

Пример входной последовательности ЛЧМ-импульсов на фоне гауссовского шума с равномерной спектральной плотностью и результата ее обработки во временной и частотной областях приведен на рис. 3, где: а) временное представление последовательности ЛЧМ-импульсов на входе приемного устройства; б) временное представление выходного сигнала автокоррелятора после прохождения через фильтр низких частот; в) спектральное представление выходного сигнала автокоррелятора после прохождения через фильтр низких частот.

Так как перемножение сигналов и низкочастотная фильтрация по сути являются процедурой демодуляции последовательности ЛЧМ-импульсов, то на выходе автокорреляционной схемы формируется последовательность простых радиоимпульсов (РИ), несущая частота которых пропорциональна скорости изменения частоты обрабатываемого ЛЧМ-сигнала и временной задержки  $\tau_3$ .

Вариантом окончательного этапа процесса принятия решения о наличии или отсутствии сигнала является пороговая обработка спектра (рис. 3, в) и оценка наличия периодических частотных составляющих в его структуре.

Такой подход показал достаточно высокую эффективность при условии равномерности спектра шумовой составляющей принятого сигнала. Однако в реальной обстановке это условие зачастую не выполняется вследствие наличия сторонних источников мешающих сигналов и помех.

Так, на рис. 4 показан вид входной реализации сигнала при отсутствии ЛЧМ-последовательности и результата ее обработки. Как видно (рис. 4, в), в спектре присутствуют частотные составляющие, превышающие уровень шума, вследствие чего принимается ошибочное решение о наличии ЛЧМ-последовательности, то есть имеет место ложная тревога (ЛТ).

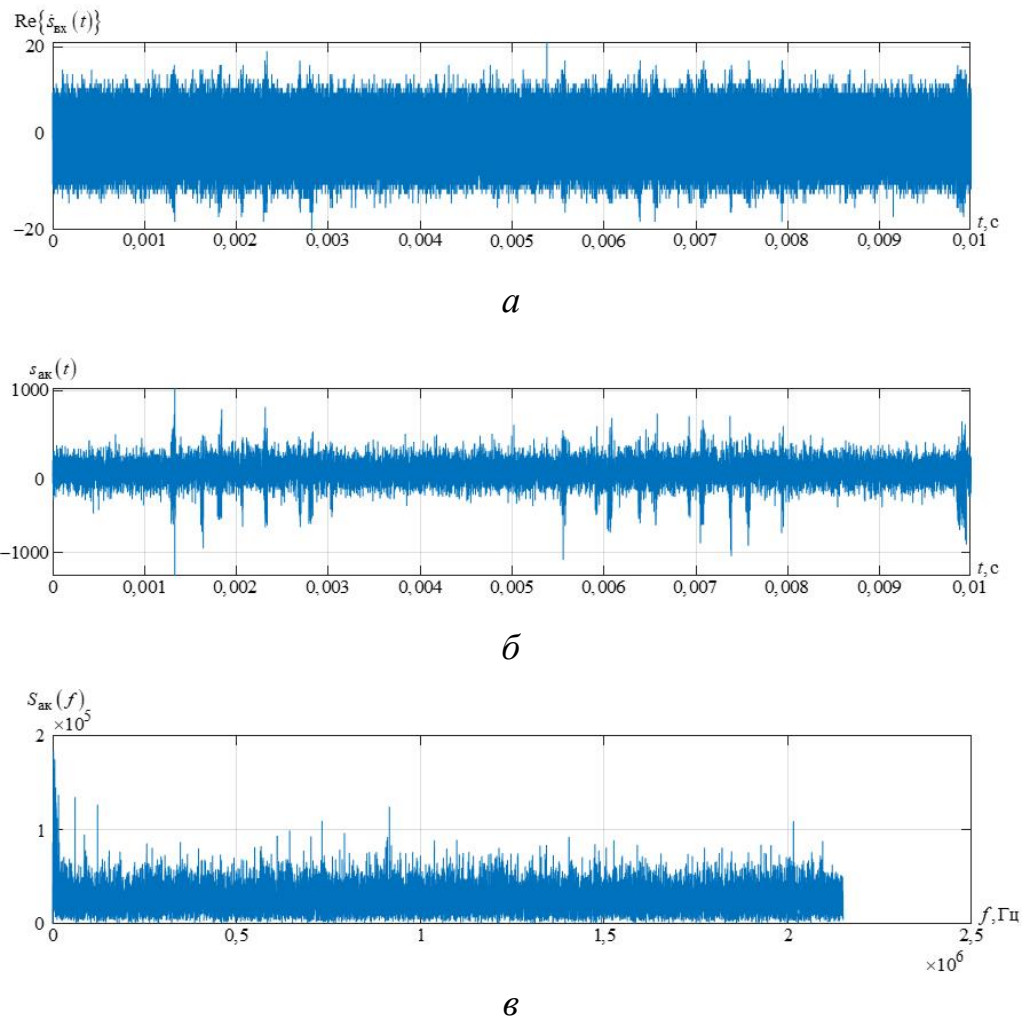


Рис. 4. Запись сигнала в реальной шумовой и помеховой обстановке на различных этапах автокорреляционной обработки, ложно определенная схемой как имеющая импульсную ЛЧМ-последовательность (ложная тревога).

На рис. 5 продемонстрирован вид входной реализации смеси сигнала с присутствующей ЛЧМ-последовательностью и помеховой периодической последовательностью и результата ее обработки. При тех же пороговых параметрах, что и для записи, продемонстрированной на рис. 4, принимается решение об отсутствии ЛЧМ-последовательности, то есть имеет место пропуск цели (ПЦ).

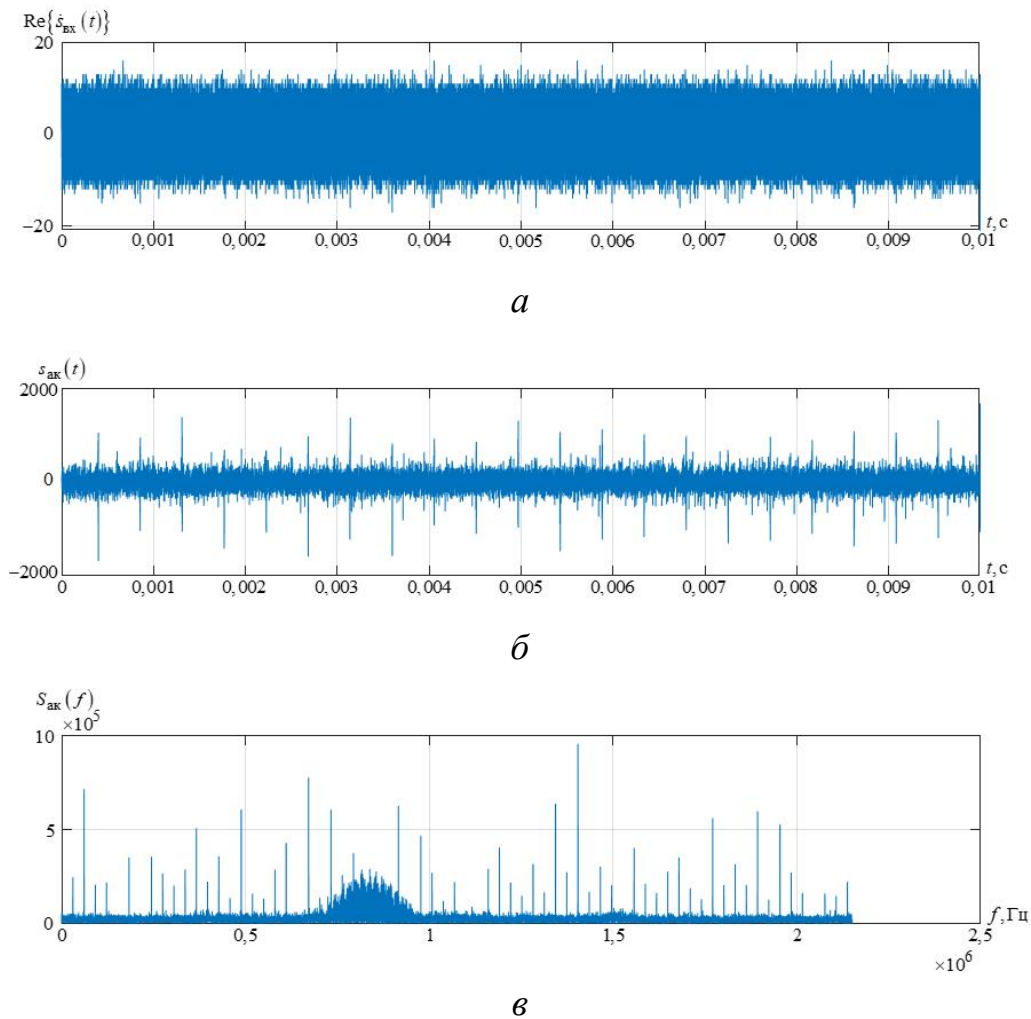


Рис. 5. Запись сигнала в реальной шумовой и помеховой обстановке на различных этапах автокорреляционной обработки, ложно определенная схемой как шумовая (пропуск цели).

Эти ситуации приводят к необходимости поиска новых средств и инструментов, которые при решении данной задачи позволят снизить количество ЛТ до требуемого уровня (менее  $10^{-2}$ ) при незначительном увеличении количества пропусков цели (менее 10 %).

## 2. Нейросетевой подход

В последнее время высокую эффективность обнаружения и классификации сигналов на фоне помех различного вида демонстрируют подходы, основанные на применении технологий машинного обучения [4,5]. В связи с этим был апробирован нейросетевой подход к решению задачи снижения количества ложных тревог.

Для обучения и тестирования нейросети были сформированы 5 наборов записей [6], включающие как реальные, так и синтезированные реализации сигналов и помех. Параметры каждой записи: количество временных отсчетов в записи  $N_{\text{отс}} = 9,3 \cdot 10^5$ , длительность  $t_{\text{зап}} = 10$  мс, для синтезированных записей девиация, длительность, период повторения и начальная частота ЛЧМ-импульсов задавались случайными и равномерно распределенными на интервалах  $\Delta f \in [8 \dots 60]$  МГц,  $\tau_{\text{и}} \in [5 \dots 25]$  мкс,  $T \in [150 \dots 500]$  мкс и  $f_{\text{н}} \in [2 \dots 25]$  МГц соответственно. Детальные характеристики наборов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Перечень наборов данных для нейронной сети.

Название набора	Характер данных	Количество уникальных записей			ОСШ, дБ
		Всего	с ЛЧМ-сигналом	Без ЛЧМ-сигнала	
Набор №1	реальные записи	2227	114	2113	–
Набор №2	синтезированные записи	2227	114	2113	–5 ... 5
Набор №3	синтезированные записи	2227	114	2113	–10 ... 0
Набор №4	смешанные (объединение наборов №1 и №2)	4454	228	4226	–5 ... 5
Набор №5	смешанные (объединение наборов №1 и №3)	4454	228	4226	–10 ... 0

Поиск архитектуры сети, ее обучение и последующее тестирование на указанных наборах данных (таблица 1) осуществлялась с применением следующих программных средств: интерпретатор языка программирования Python версии 3.10, открытая программная библиотека машинного обучения TensorFlow-GPU версии 2.8.0, фреймворк Keras версии 2.8.0.

Обучение и тестирование проводилось на ЭВМ со следующими характеристиками: Intel(R) Core(TM) i5-4460 CPU @ 3.20 ГГц; 2xDDR3-1600 AMD 8Gb; 2xDDR3-1600 Kingston 4 Gb (суммарный объем: 24 Гб); GPU ASUS NVIDIA GeForce RTX 3060 12 Gb; HDD Samsung 320 Gb 7200 rpm.

По результатам поиска наиболее подходящей архитектуры выбор был сделан в пользу сети, продемонстрировавшей наиболее высокие результаты, с архитектурой, приведенной на рис. 6.



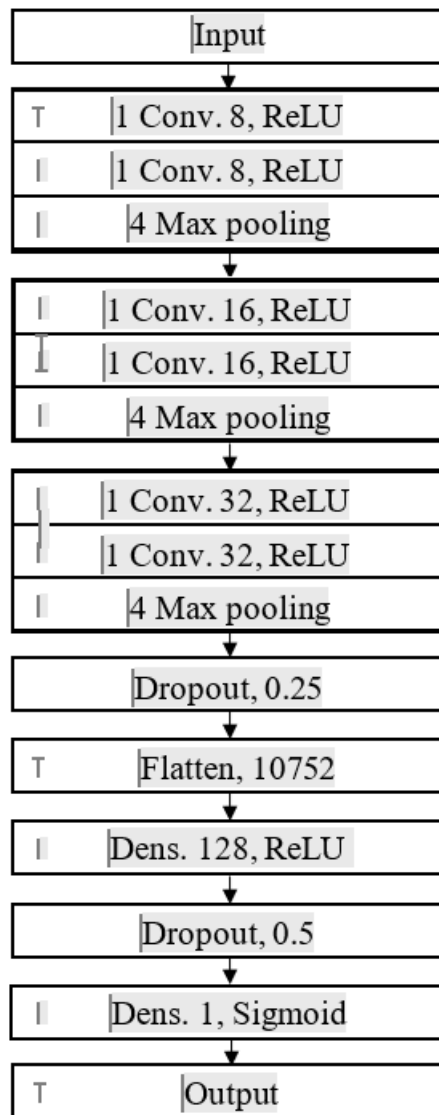


Рис. 6. Архитектура нейронной сети.

Сеть включает 8 слоев, первые 6 из которых являются одномерными сверточными (Conv1D), а 2 окончных – полносвязными (Dense). В сети также применяются пулинговые слои (MaxPooling1D), слои дропаута с параметрами 0,25 и 0,5, а также слой Flatten для перехода от сверточных к полносвязному слою. Выходной слой сети представлен одним нейроном с сигмоидальной функцией активации. В качестве функции активации остальных слоев использовалась ReLU. Обучение модели осуществлялось с использованием оптимизатора Adam при скорости обучения  $10^{-6}$ , в качестве функции потерь использовалась бинарная кроссэнтропия.

Результаты, полученные при оценке точности обнаружения ЛЧМ-сигналов в каждом из наборов, приведены в таблице 2. Для каждого из наборов указана

достигнутая точность детектирования  $P_{\text{дет}}$ , количество ЛТ  $N_{\text{ЛТ}}$  (абсолютное и относительное значения), количество ПЦ  $N_{\text{ПЦ}}$  (абсолютное и относительное значения).

Таблица 2. Результаты тестирования нейронной сети.

Параметры тестируемого набора		Набор №1	Набор №2	Набор №3	Набор №4	Набор №5		
Параметры обучающего набора	Кол-во записей в наборе	Всего			2227		4454	
		с ЛЧМ			114		228	
		без ЛЧМ			2113		4226	
Набор №1	$P_{\text{дет}}$	99,78 %	97,26 %	95,37 %	98,49 %	97,57 %		
	$N_{\text{ЛТ}}$	0 / 2113	0 / 2113	0 / 2113	0 / 4226	0 / 4226		
		<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>		
	$N_{\text{ПЦ}}$	5 / 114	61 / 114	103 / 114	67 / 228	108 / 228		
	4,39 %	53,51 %	90,35 %	29,39 %	47,37 %			
Набор №2	$P_{\text{дет}}$	99,19 %	99,46 %	97,30 %	99,33 %	98,25 %		
	$N_{\text{ЛТ}}$	3 / 2113	0 / 2113	0 / 2113	3 / 4226	3 / 4226		
		<b>0,14 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,07 %</b>	<b>0,07 %</b>		
	$N_{\text{ПЦ}}$	15 / 114	12 / 114	60 / 114	27 / 228	75 / 228		
	13,16 %	10,53 %	52,63 %	11,84 %	32,89 %			
Набор №3	$P_{\text{дет}}$	98,29 %	99,37 %	97,71 %	98,83 %	98,00 %		
	$N_{\text{ЛТ}}$	6 / 2113	0 / 2113	0 / 2113	6 / 4226	6 / 4226		
		<b>0,28 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,14 %</b>	<b>0,14 %</b>		
	$N_{\text{ПЦ}}$	32 / 114	14 / 114	51 / 114	46 / 228	83 / 228		
	28,07 %	12,28 %	44,74 %	20,17 %	36,40 %			
Набор №4	$P_{\text{дет}}$	99,77 %	99,55 %	97,26 %	99,66 %	98,52 %		
	$N_{\text{ЛТ}}$	0 / 2113	0 / 2113	0 / 2113	0 / 4226	0 / 4226		
		<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>		
	$N_{\text{ПЦ}}$	5 / 114	10 / 114	61 / 114	15 / 228	66 / 228		
	4,39 %	8,78 %	53,51 %	6,58 %	28,95 %			
Набор №5	$P_{\text{дет}}$	99,51 %	99,06 %	97,08 %	99,28 %	98,29 %		
	$N_{\text{ЛТ}}$	0 / 2113	0 / 2113	0 / 2113	0 / 4226	0 / 4226		
		<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>		
	$N_{\text{ПЦ}}$	11 / 114	21 / 114	65 / 114	32 / 228	76 / 228		
	9,65 %	18,42 %	57,02 %	14,03 %	33,33 %			
Результаты, полученные способом пороговой обработки	$P_{\text{дет}}$	95,91 %	99,82 %	98,29 %	86,62 %	85,59 %		
	$N_{\text{ЛТ}}$	83 / 2113	0 / 2113	0 / 2113	580 / 4226	580 / 4226		
		<b>3,93 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>13,73 %</b>	<b>13,73 %</b>		
	$N_{\text{ПЦ}}$	8 / 114	4 / 114	38 / 114	16 / 228	62 / 228		
	7,02 %	3,51 %	33,33 %	7,02 %	27,19 %			

Из полученных результатов (таблица 2) следует, что сети, обученные на реальных и смешанных наборах (наборы №1, 4 и 5), демонстрируют отсутствие ложных тревог. При этом отметим, что наилучший результат по всем наборам демонстрирует сеть, обученная на наборе №4, так как во всех тестах отсутствуют ЛТ, а относительное количество ПЦ на наборах с ОСШ не хуже минус 5 дБ не превышает 10%. Исключением являются наборы №3 и №5,

что связано со значительным количеством записей с ОСШ менее минус 5 дБ, при котором обнаружение сигнала даже оптимальными методами характеризуется низким качеством.

## Заключение

Таким образом, применение нейросетевого подхода позволило относительно просто устранить ложные тревоги в сложной сигнально-помеховой обстановке, что при использовании традиционных методов представляет собой существенно более сложную задачу.

## Литература

1. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография // Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга». – 2014.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – 1983.
3. Лихачев В.П. и др. Обоснование требований к вычислительному устройству цифрового автокорреляционного приемника сигналов РСА //Журнал радиоэлектроники. – 2014. – №. 1. – С. 9-9.
4. Akyon F.C. Deep Learning in Electronic Warfare Systems: Automatic Pulse Detection and Intra-Pulse Modulation Recognition: дис. – Bilkent Universitesi (Turkey), 2020.
5. Франсуа Ш. Глубокое обучение на Python. – "Издательский дом "Питер"", 2018.
6. Груздев А.В. Предварительная подготовка данных в Python: Том 1. Инструменты и валидация. – М.: ДМК Пресс – 2023.

## Для цитирования:

Бердник М.О. Алгоритм обнаружения зондирующих сигналов с линейной частотной модуляцией на основе нейросетевой обработки их спектров на выходе автокорреляционной схемы. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.11>