

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ СИГНАЛОВ В СЕТЯХ 5G

Б.Б. Саидов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В работе рассматривается возможность повышения эффективности сетей связи пятого поколения за счёт использования методов интеллектуального прогнозирования. Цель исследования заключается в применении нелинейной авторегрессионной нейронной сети (NARNN) для анализа и прогнозирования изменений параметров радиосигнала в сетях 5G с последующим проактивным управлением радиоресурсами. В качестве исходных данных использованы временные ряды показателей RSRP и SINR, характеризующие состояние радиоканала. Моделирование выполнено с использованием нейросетевой архитектуры с временными задержками, обученной на экспериментальных данных. Оценка качества прогноза проводилась на основе стандартных метрик ошибки. Результаты исследования показывают, что применение NARNN позволяет заранее выявлять снижение качества соединения и адаптировать параметры сети, обеспечивая более устойчивую и надёжную работу сетей пятого поколения.

Ключевые слова: сети пятого поколения, нелинейная авторегрессионная нейронная сеть, прогнозирование сигналов, временные ряды, управление радиоресурсами, качество связи.

ТАТБИҚИ ШАБАКАИ НЕЙРОНИИ АВТОРЕГРЕССИОНИИ ҒАЙРИХАТТӢ БАРОИ ТАҲЛИЛИ ПЕШГУИШАВАНДА ВА БЕҲСОЗИИ СИГНАЛҶО ДАР ШАБАКАҶОИ 5G

Б.Б. Саидов

Дар мақола имконияти баланд бардоштани самаранокии шабакаҳои алоқаи насли панҷум бо истифода аз усулҳои пешгуи зехнӣ баррасӣ шудааст. Ҳадафи таҳқиқот истифодаи шабакаи нейронии авторегрессии ғайрихаттӣ (NARNN) барои таҳлил ва пешгуи тағйирёбии параметрҳои сигнали радио дар шабакаҳои 5G ва идоракунии пешакӣ-и захираҳои радиосувнаӣ мебошад. Ҳамчун додаҳои ибтидоӣ қаторҳои вақти нишондиҳандаҳои RSRP ва SINR, ки ҳолати канали радиоро тавсиф мекунад, истифода шуданд. Моделсозӣ бо истифода аз сохтори шабакаи нейронӣ бо таъхирҳои вақтӣ, ки бар асоси додаҳои таҷрибавӣ омӯзонида шудааст, анҷом дода шуд. Сифати пешгуи бо истифода аз нишондиҳандаҳои стандартии ҳагоғӣ арзёбӣ гардид. Натиҷаҳои таҳқиқот нишон медиҳанд, ки истифодаи NARNN имкон медиҳад пастшавии сифати алоқа пешакӣ ошкор шуда, параметрҳои шабака мутобиқ гарданд, ки ин ба кори устувор ва боэътимоди шабакаҳои насли панҷум мусоидат мекунад.

Калидвожаҳо: шабакаҳои насли панҷум, шабакаи нейронии авторегрессии ғайрихаттӣ, пешгуи сигналҳо, қаторҳои вақт, идоракунии захираҳои радио, сифати алоқа.

APPLICATION OF NONLINEAR AUTOREGRESSIVE NEURAL NETWORK FOR PREDICTIVE ANALYSIS AND SIGNAL OPTIMIZATION IN 5G NETWORKS

B.B. Saidov

This paper explores the possibility of improving the efficiency of fifth-generation communication networks through the use of intelligent forecasting methods. The aim of the study is to apply a nonlinear autoregressive neural network (NARNN) for the analysis and prediction of changes in radio signal parameters in 5G networks, followed by proactive radio resource management. Time series of RSRP and SINR indicators characterizing the state of the radio channel are used as input data. The modeling is carried out using a neural network architecture with time delays trained on experimental data. The forecasting accuracy is evaluated using standard error metrics. The results demonstrate that the application of NARNN makes it possible to detect signal quality degradation in advance and adapt network parameters, thereby ensuring more stable and reliable operation of fifth-generation networks.

Keywords: fifth-generation networks, nonlinear autoregressive neural network, signal forecasting, time series, radio resource management, communication quality.

Введение

Развертывание и коммерческая эксплуатация сетей пятого поколения (5G) ознаменовали новую эру в телекоммуникациях, предложив беспрецедентные скорости передачи данных, сверхнадёжные соединения с низкой задержкой (URLLC) и массовое подключение устройств (mMTC). Однако реализация этих амбициозных преимуществ сталкивается с серьёзными техническими вызовами [1-5]. В отличие от предыдущих поколений сети 5G характеризуются высокой гетерогенностью, использованием миллиметровых волн и сложными механизмами, такими как массивный MIMO и формирование луча [6-10].

Эффективность таких сложных систем напрямую зависит от способности динамически и интеллектуально управлять радиоресурсами. Качество принимаемого сигнала (RSRP, SINR)

подвержено постоянным и быстрым изменениям из-за мобильности пользователей, многолучевого распространения, замираний и интерференции. Традиционные (реактивные) методы управления, реагирующие на уже произошедшее ухудшение C-V2X (качества), недостаточны для поддержания требуемых параметров QoS/QoE [10-12].

Возникает острая необходимость в проактивных (предиктивных) механизмах, способных прогнозировать будущее состояние канала. Однако сигналы в сетях 5G представляют собой сложные нелинейные временные ряды. Попытки их моделирования с помощью классических линейных авторегрессионных моделей (AR, ARMA) часто приводят к низкой точности прогноза, поскольку они не могут уловить всю сложность и нелинейные зависимости в данных.

В последние годы методы машинного обучения (ML) и, в частности, нейронные сети, демонстрируют выдающиеся результаты в решении задач анализа временных рядов. Для прогнозирования состояния радиоканала особый интерес представляют рекуррентные архитектуры [13-16].

В данной работе в качестве основного инструмента предлагается нелинейная авторегрессионная нейронная сеть (NARNN). Эта архитектура является динамической нейронной сетью, которая явным образом использует прошлые значения прогнозируемого ряда в качестве входных данных, что делает ее идеально подходящей для моделирования временных зависимостей. В отличие от своих линейных аналогов NARNN способна аппроксимировать сложные нелинейные функции, лежащие в основе динамики сигнала 5G.

Целью данной работы является исследование и демонстрация эффективности применения нелинейной авторегрессионной нейронной сети для предиктивного анализа и последующей оптимизации параметров сигнала в сетях 5G.

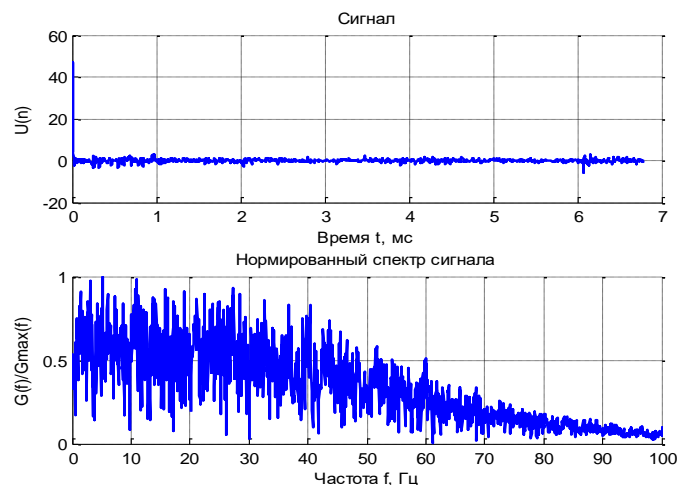


Рисунок 1 – Сигнал третьего типа и его спектральная плотность мощности

Модель нелинейной авторегрессионной сети

Для проведения моделирования была использована нелинейная авторегрессионная нейронная сеть (НАРС) с параметрами, заданными по умолчанию. Конфигурация сети и параметры обучения имели следующий вид:

- Алгоритм обучения: BFGS (квазиньютоновский метод).
- Метод одномерного поиска: алгоритм Чараламбуca.
- Начальная скорость обучения: 0,1.
- Объем обучающей выборки: 4300 отсчётов.
- Объем валидационной (проверочной) выборки: 1600 отсчётов.
- Тип распределения данных: случайное разбиение на обучающую, проверочную и тестовую выборки.
- Количество нейронов скрытого слоя: 9.
- Количество выходных нейронов (прогнозируемых отсчётов): 4.
- Глубина задержки входного сигнала: 3 временных шага.

Таблица 1– Результаты обучения НАРС сети и прогноза на 4 отсчета

Результаты обучения				
Время обучения (секунд)	Количество итераций	Причина останова	Значение градиента	Значение параметра минимизации
74.950000	66	Validation stop	1.604297e-01	3.720646e-02
Результат прогноза на тестовом множестве: Ошибки прогноза				
Для 1-го нейрона				
CAO	СКО	СПО		
1.035035e-01	2.657801e-02	33.000326 %		
Для 2-го нейрона				
CAO	СКО	СПО		
1.154178e-01	2.909257e-02	-1.197022 %		
Для 3-го нейрона				
CAO	СКО	СПО		
1.646659e-01	5.293383e-02	-1.197022 %		
Для 4-го нейрона				
CAO	СКО	СПО		
2.348273e-01	9.366414e-02	157.485184 %		

Окно обучения со структурой сети и структура сети после удаления задержки показаны на рисунке 2. На рисунке 3 показан график изменения СКО. На рисунках 4-7 представлены графики прогноза и соответствующих ошибок для проверочного множества.

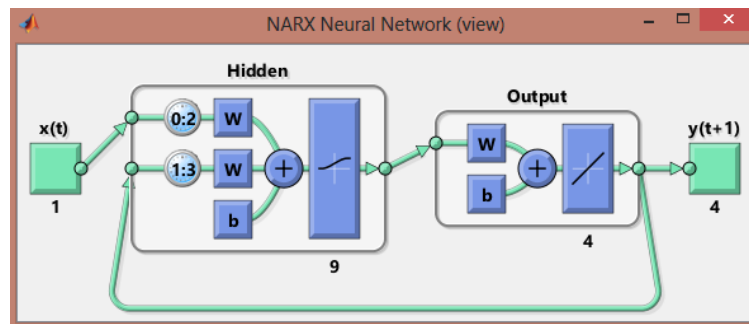


Рисунок 2 – Модифицированная структура сети после исключения задержки (нижнее окно)

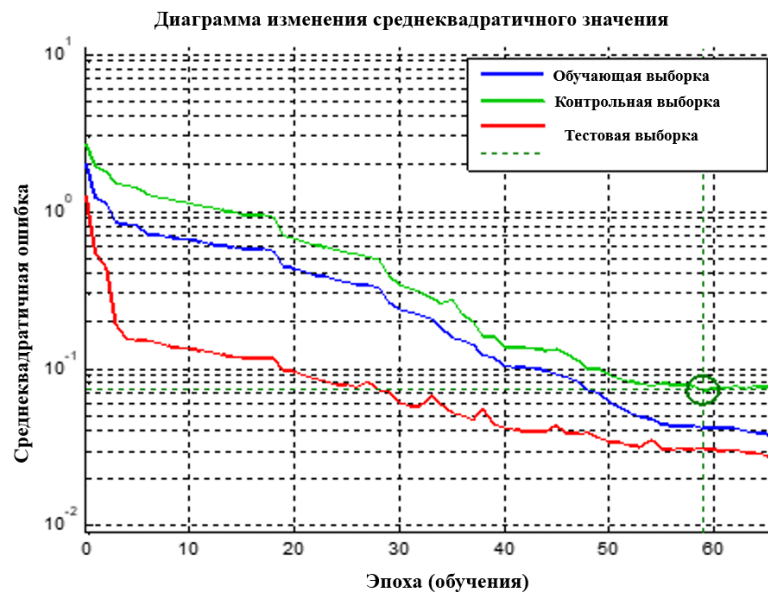


Рисунок 3 – Изменение среднеквадратической ошибки в ходе обучения

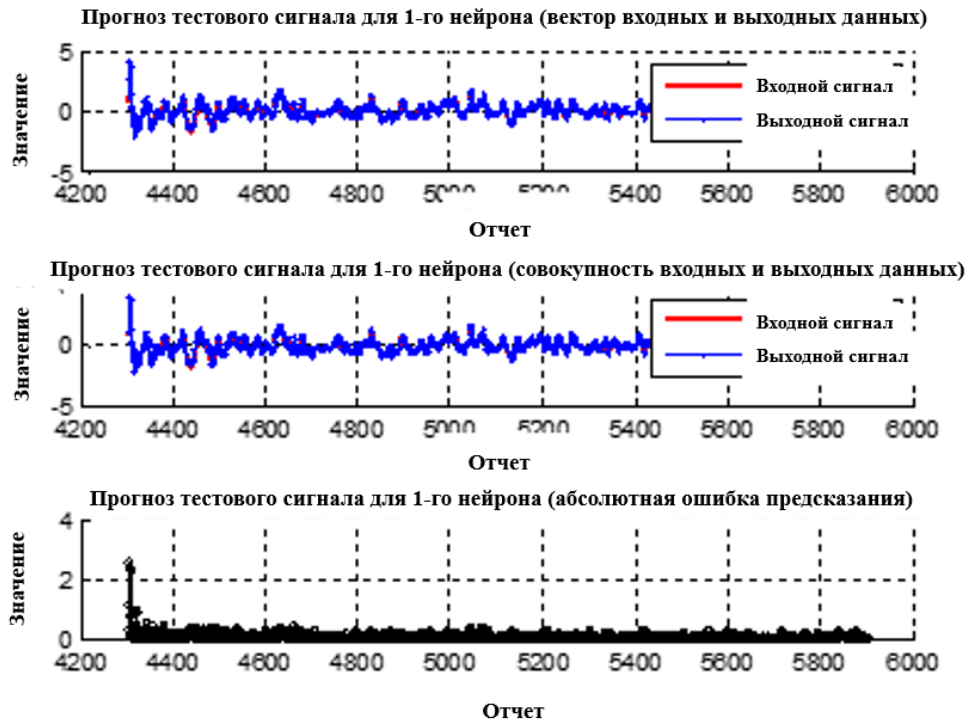


Рисунок 4 – Прогноз тестового сигнала, полученного на выходе первого нейрона

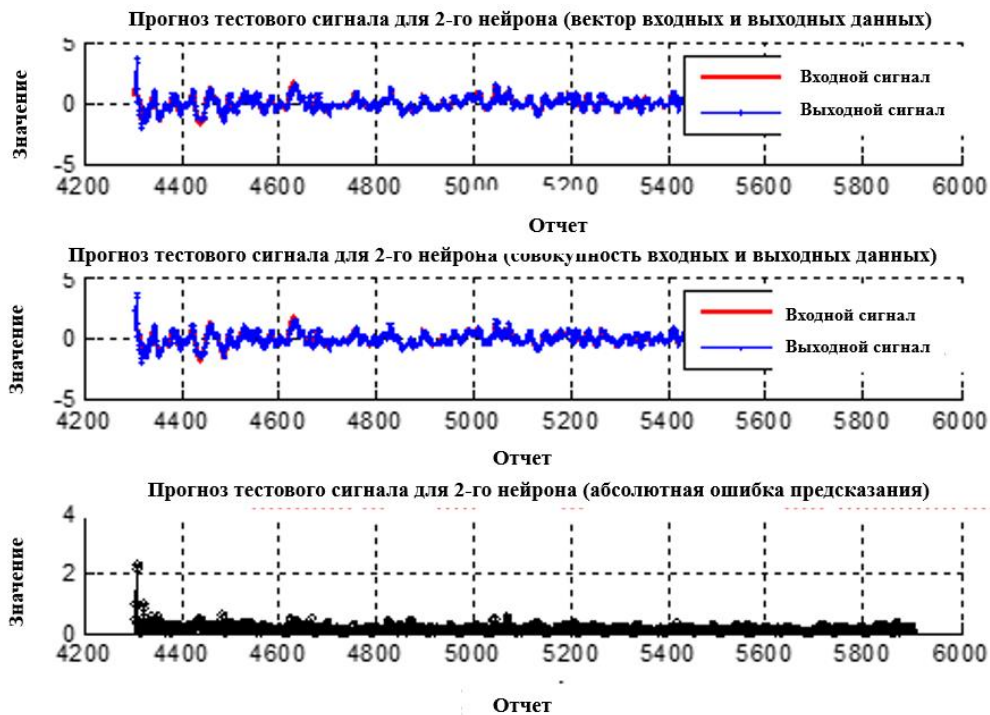


Рисунок 5 – Прогноз тестового сигнала по выходу второго нейрона

Сравнительный анализ моделей и определение наиболее эффективной

В качестве лучшей мы рассматриваем ту модель ИНС, которая показывает наименьшие значения ошибки прогноза и требует минимального времени на обучение. Итоги сравнения сведены в таблицу 1, где номер указывает относительное качество модели. По результатам анализа наиболее

эффективно справилась с задачей фокусированная линейная сеть с задержками на входе, случайным распределением выборок и обучением по алгоритму Левенберга–Марквардта.

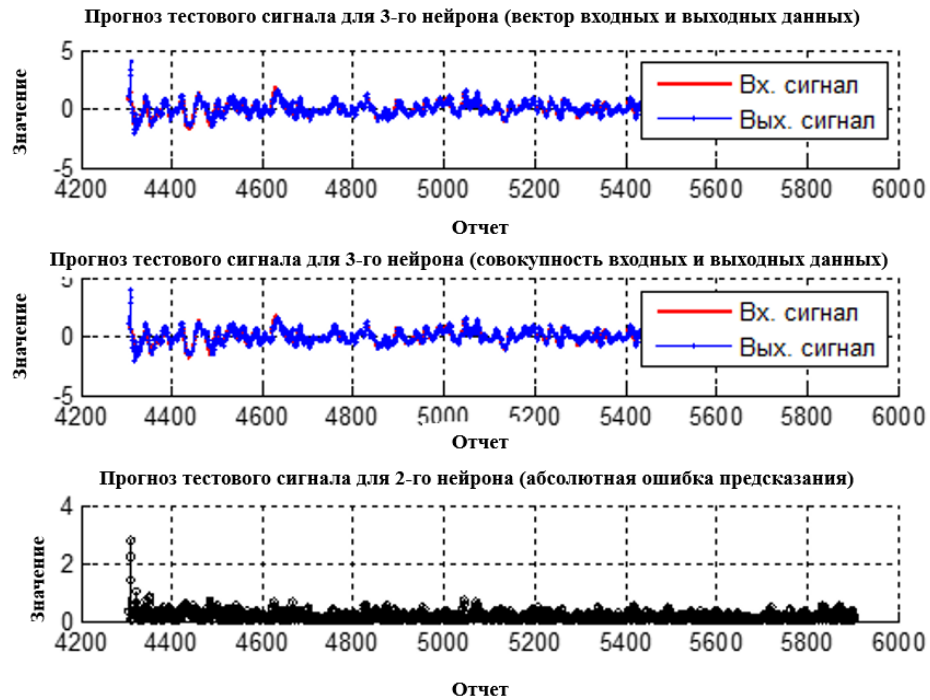


Рисунок 6 – Прогноз тестового сигнала, полученного на выходе третьего нейрона

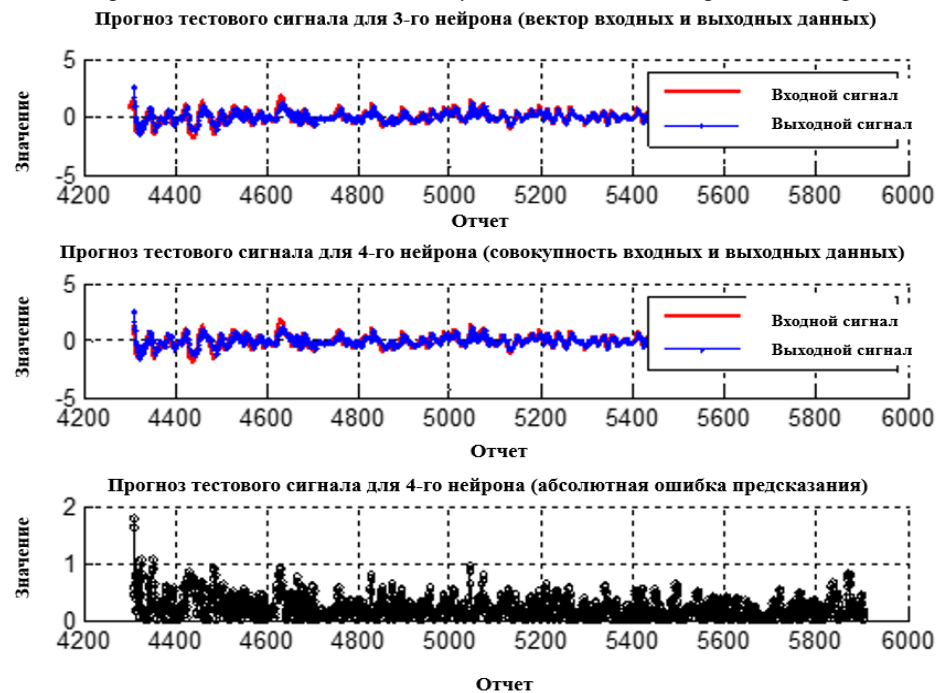


Рисунок 7 – Прогноз тестового сигнала, сформированного выходом четвертого нейрона

Нелинейная авторегрессионная сеть показала приемлемый результат только в режиме многошагового прогноза, однако в целом её работа оказалась нестабильной. Что касается алгоритма БФГШ, то при стандартных параметрах он продемонстрировал низкую эффективность.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа ИНС

№	Тип ИНС	Алгоритм обучения	Распределение выборок
1	ФЛС	ЛМ	Случайное
2	ФЛС	ЛМ	Последовательное
3	ФЛС	БФГШ-ПСВ	Последовательное
4	НАРС	ЛМ	Случайное
5	НАРС	ЛМ	Последовательное
6	АДАЛИН	ДП	Последовательное
7	ФЛС	БФГШ-ПСВ	Случайное
8	НАРС	БФГШ-ПСВ	Случайное
9	НАРС	БФГШ-ПСВ	Последовательное

Исследование качества прогнозирования на основе оптимальной модели ИНС

Верификация прогностических свойств синтезированной модели осуществлялась на примере узкополосного сигнала 4-го типа (визуализация представлена на рис. 8). В рамках численного эксперимента была реализована процедура одношаговой экстраполяции с последующей декомпозицией на расширенный горизонт планирования, охватывающий 20 временных отсчетов. Для реализации вычислительного процесса была сконфигурирована искусственная нейронная сеть (ИНС) со следующими гиперпараметрами: Параметры используемой ИНС, следующие: число скрытых нейронов - 15, скорость обучения - 0,0005, число элементов задержки - 5. Подобный выбор структурных параметров обусловлен необходимостью обеспечения баланса между вычислительной мощностью модели и её способностью к генерализации при обработке динамических последовательностей. Использование указанного числа элементов задержки позволяет учитывать авторегрессионные зависимости сигнала без избыточного усложнения графа вычислений.

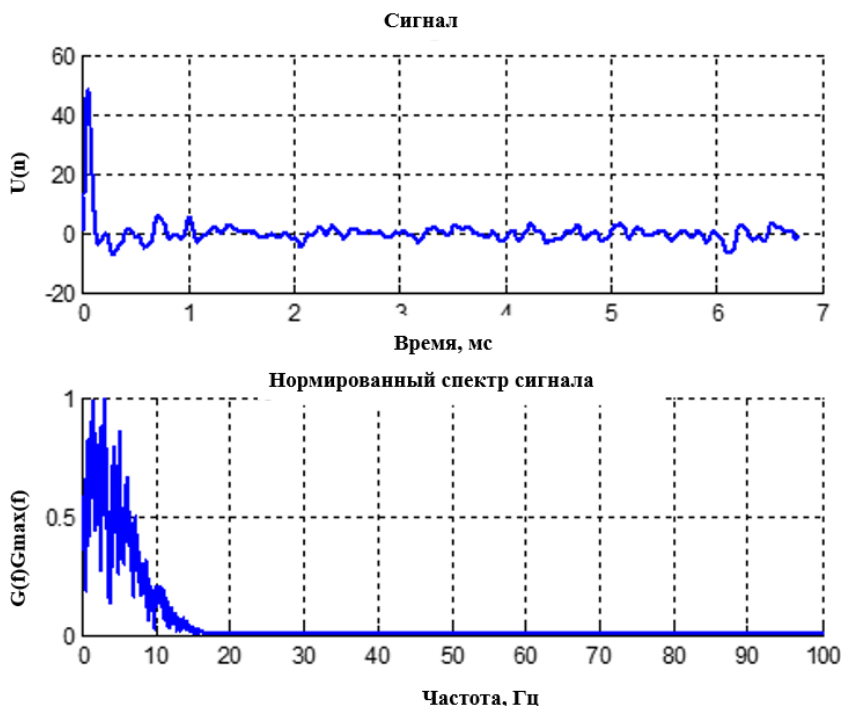


Рисунок 8 – Сигнал 4-го типа и соответствующая спектральная плотность мощности

Использовались параметры алгоритма по умолчанию. Результаты прогноза представлены на рисунке 9.

В таблице 3 приведены результаты обучения и одношагового прогнозирования при числе выходных нейронов, равном 20

Таблице 2 – Результаты обучения и одношагового прогнозирования при числе выходных нейронов

Результаты обучения				
Время обучения (секунд)	Количество итераций	Причина останова	Значение градиента	Значение параметра минимизации
3412.887000	595	Validation stop	1.890482e-04	7.561870e-04
Суммарные ошибки				
САО	СКО	СПО		
1.602018	4.538997e-01	43.513140		

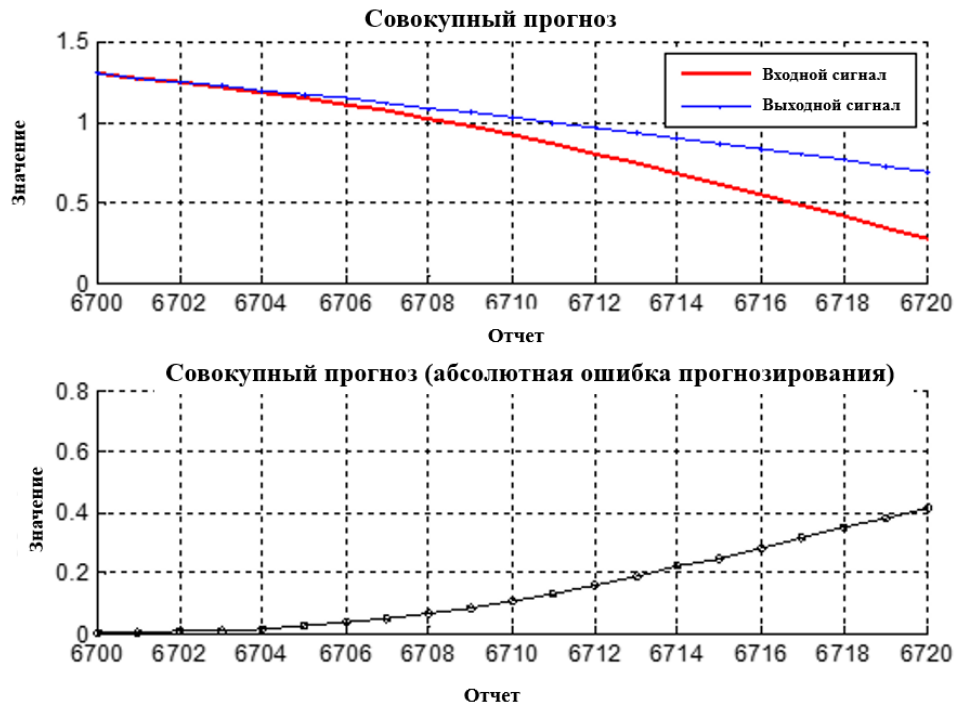


Рисунок 9 – График совокупного прогноза по всем отсчетам при числе выходных нейронов, равном 20

Результаты, представленные на рис. 21, свидетельствуют об инверсной зависимости между горизонтом прогнозирования и точностью аппроксимации. Наблюдаемый нелинейный рост среднеквадратичной ошибки при увеличении числа шагов подтверждает квадратичный характер деградации точности. Данный феномен детерминирован рекурсивной структурой алгоритма: накопление стохастических погрешностей на промежуточных итерациях приводит к их мультипликативному влиянию на последующие значения. Вследствие этого при долгосрочном прогнозировании отмечается существенное расхождение расчетных и фактических данных.

Заключение

В рамках представленного исследования была проанализирована эффективность применения нелинейных авторегрессионных нейронных сетей (NARNN) в качестве инструмента прогнозного моделирования сигнальных характеристик в инфраструктуре сетей 5G. Полученные результаты подтверждают валидность использования архитектур класса NARNN для аппроксимации динамики таких показателей, как RSRP и SINR. Внедрение подобных аналитических моделей в системы управления радиоресурсами позволяет реализовать концепцию предиктивного сетевого менеджмента, способствуя существенной минимизации межканальной интерференции.

Сравнительная оценка различных топологий искусственных нейронных сетей выявила, что в задачах краткосрочной и многошаговой экстраполяции наиболее высокой эффективностью обладает

фокусированная линейная сеть с входными линиями задержки (TLFN), обученная по методу Левенберга–Марквардта с использованием рандомизированной выборки. Было установлено, что стандартные нелинейные авторегрессионные структуры сохраняют операционную стабильность преимущественно в сценариях многошагового анализа, требуя при этом прецизионной калибровки гиперпараметров при увеличении вектора прогнозирования.

Особое внимание уделено зависимости точности модели от глубины прогноза. Экспериментально доказано, что при расширении горизонта планирования (до 20 отсчетов) наблюдается прогрессирующая деградация качества аппроксимации. Данный процесс характеризуется нелинейным (квадратичным) ростом погрешности, что обусловлено кумулятивным эффектом итерационного накопления ошибок на каждом этапе вычислений.

Подводя итог, можно констатировать, что использование аппарата нелинейных авторегрессионных сетей является научно обоснованным и перспективным направлением для интеллектуального анализа сигналов 5G. Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения КПД использования радиочастотного ресурса и обеспечении устойчивости соединений в условиях высокой волатильности характеристик радиоканала.

Рецензент: Хасанов Дж.Р. – к.т.н., доцент кафедры информационных технологий и цифровой экономики ИЦПУИМ, МУНИТЭИИ.

Литература

1. Петровых В.В. Исследование влияния структуры нейронной сети на параметры прогноза ограниченного по полосе радиотехнического сигнала // ЮУрГУ. - 2016. - С. 73.
2. Саидов, Б. Б. Разработка модели мультидиэлектрической осевой антенны для передачи и приема информации / Б. Б. Саидов, И. Саъдулло, Д. А. Абдурашулов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 3(67). – С. 42-48. – EDN ZRZMVE.
3. Dmitri M., Eduard S., Vyacheslav B., Andrey S., Yevgeni K., and Konstantin S. A Tutorial on Mathematical Modeling of 5G/6G Millimeter Wave and Terahertz Cellular Systems / M. Dmitri, S. Eduard, B. Vyacheslav, S. Andrey, K. Yevgeni, and S. Konstantin // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – P. 1-46.
4. Saidov, B.B. Opto-ultrasonic communication channels / B.B. Saidov, V.F. Telezhkin. // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. – 2020. – Vol. 20. – no.4. – pp. 55-62.
5. Telezhkin, V. Recognition and Elimination of Anomalies in Information Leakage Channels in Opto-Ultrasonic Communication Channels in Data Streams of Industrial Automated Systems / V. Telezhkin, B. Saidov, A. Ragozin // Proceedings – 2021 International Russian Automation Conference. – 2021. – P. 201-206.
6. Saidov, B.B. Development of Equipment for Experimental Study of Digital Algorithms in Nonstationary Signal Processing Problems / B.B. Saidov, V.F. Telezhkin, N.N. Gudaev [et al.] // Ural Radio Engineering Journal. – 2022. – Vol. 6. – no. 2. – P. 186-204.
7. Sakib, S. A Deep Learning Method for Predictive Channel Assignment in Beyond 5G Networks. / S. Sakib, T. Tazrin, M.M. Fouda, Z.M. Fadlullah and N. Nasser // in *IEEE Network*, – vol. 35. – no. 1. – pp. 266-272.
8. Arfaoui, A. Context-Aware Adaptive Remote Access for IoT Applications / A. Arfaoui, // *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 1, Jan. 2020, pp. 786–99.
9. Fabio D.L. 5G cascaded channel estimation using convolutional neural networks / D.L. Fabio, S. Hugerles, S.R. Oliveira // *Digital Signal Processing* Vol. - 126. – 2022- P. 103483
10. Ning, L. An efficient combined deep neural network based malware detection framework in 5G environment / L. Ning, L. Dan, Sh. Wenbo, V. Pandi, P. Francesco, C. Victor // *Computer Networks*. Vol. 189. - 2021, P. 107932.
11. Telezhkin, V. Recognition and Elimination of Anomalies in Information Leakage Channels in Opto-Ultrasonic Communication Channels in Data Streams of Industrial Automated Systems / V. Telezhkin, B. Saidov A. Ragozin // Proceedings – 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., – 2021. – P. 201-206.
12. Saidov, B. Simulation of ultrasonic sensor at lower ultrasonic range in data transmission / B. Saidov, V. Telezhkin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. – 2021. – P. 703-707.
13. Saidov, B. Transformation of the Amplitude-Modulated Spectrum of a Signal on a Nonlinear Element / B. Saidov V. Telezhkin // Proceedings – 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. – 2020. – P. 757-761.

14. Саидов, Б. Б. Методы и результаты экспериментально-теоретического исследования систем связи 5G / Б. Б. Саидов, И. Саъдулло, Н. Б. Хусейнзода // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2025. – № 4(72). – С. 23-27. – DOI 10.65599/QFAC8409. – EDN MWRMSY.

15. Саидов, Б. Б. Применение нейросетевых методов прогнозирования радиосигналов в интеллектуальных системах связи 5G / Б. Б. Саидов, И. Саъдулло, Н. Б. Хусейнзода // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2025. – № 4(72). – С. 28-38. – DOI 10.65599/BCWW3084. – EDN IGVLAЕ.

16. Косимов, А. А. О распознавании автора текстового фрагмента на основе частотности слогов / А. А. Косимов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4(56). – С. 59-64. – EDN DUNIFH.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ - INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Саидов Бехруз Бадридинович н.и.т.	Саидов Бехруз Бадридинович к.т.н	Saidov Behruz Badridinovich Candidate of Technical Sciences
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: matem.1994@mail.ru		
ORCID: 0000-0002-1200-7096		