

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ 5G

Б.Б. Саидов, И. Саъдулло, Н.Б. Хусейнзода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В работе проведено моделирование и исследование искусственных нейронных сетей (ИНС) с целью прогнозирования параметров радиосигналов различной спектральной плотности. Используются архитектуры ADALINE фокусированной линейной сети (FLN) и нелинейной авторегрессионной сети (NARX), реализованные в среде MATLAB Neural Network Toolbox. Выполнен анализ качества одношагового и многошагового прогнозирования с применением функционалов ошибок (СКО, САО, СПО). Особое внимание уделено применению результатов для интеллектуальной обработки данных в системах беспроводной связи пятого поколения (5G), где прогнозирование характеристик радиосигнала позволяет повысить эффективность адаптивного распределения ресурсов, уменьшить задержку передачи и оптимизировать параметры модуляции. По результатам моделирования видно, что на точность и устойчивость нейросетевых прогнозов влияют и сложность спектральной структуры сигнала, и выбранные параметры обучения. При этом архитектура фокусированной линейной сети дала оптимальный баланс между скоростью обучения и точностью, а модель ADALINE оказалась более устойчивой при работе в узкой (ограниченной) полосе частот. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования параметров радиоканалов в интеллектуальных системах беспроводной связи пятого поколения (5G), где нейросетевые алгоритмы способны повысить эффективность адаптивного распределения ресурсов, снизить задержку передачи данных и улучшить устойчивость каналов связи при динамических изменениях среды распространения.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, прогнозирование сигналов, ADALINE, 5G, радиоканал.

ТАТБИҚИ УСУЛҲОИ ШАБАКАҲОИ НЕЙРОНӢ БАРОИ ПЕШГУӢИ СИГНАЛҲОИ РАДИОӢ ДАР СИСТЕМАҲОИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИИ АЛОҚАИ 5G

Б.Б. Саидов, И. Саъдулло, Н.Б. Хусейнзода

Дар ин тадқиқот моделсозӣ ва таҳлили шабакаҳои нейронӣ (ШН) бо мақсади пешгуӣи параметрҳои сигналҳои радиои бо зичии гуногуни спектралӣ анҷом дода шуд. Аз меъморҳои ADALINE, шабакаи ҳаттии фокусонӣ (FLN) ва шабакаи авторегрессии ғайриҳаттӣ (NARX), ки дар муҳити MATLAB Neural Network Toolbox татбиқ шудаанд, истифода гардид. Таҳлили сифатии пешгуӣи якҷадамаӣ ва бисёрҷадамаӣ бо истифода аз функционалҳои ҳатогӣ (тамоюли миёнаи мутлақ, ҳатогии миёнаи квадратӣ, СПО) гузаронида шуд. Таваҷҷуҳи асосӣ ба истифодаи натиҷаҳо дар системаҳои зехнии иртиботии насли панҷум (5G) равона шудааст, ки дар онҳо пешгуӣи хусусиятҳои сигнали радиои имкон медиҳад, ки тақсимои мутобикшавандаи захираҳо самараноктар шаванд, таъхири интиқол кам гардад ва параметрҳои модулятсия оптималӣ гарданд. Натиҷаҳои моделсозӣ нишон доданд, ки дақиқӣ ва устувории пешгуӣи нейрошабака аз сохтори спектрӣ ва параметрҳои омӯзиш вобаста аст. Меъмории FLN беҳтарин мувозинат байни суръати омӯзиш ва дақиқии пешгуӣро нишон дод, дар ҳоле ки модели ADALINE устувории бандро дар шароити диапазони маҳдуди басомад нишон дод. Натиҷаҳои бадастомада метавонанд барои пешгуӣи параметрҳои каналҳои радиои дар системаҳои зехнии иртиботии 5G истифода шаванд, ки дар онҳо алгоритмҳои нейрошабакавӣ метавонанд самаранокии тақсимои мутобикшавандаи захираҳо ва устувории каналҳоро дар шароити тағйирёбии муҳити интиқол банд бардоранд.

Калидвожаҳо: шабакаҳои нейронӣ, пешгуӣи сигналҳо, ADALINE, 5G, радиоканал.

APPLICATION OF NEURAL NETWORK METHODS FOR RADIO SIGNAL FORECASTING IN INTELLIGENT 5G COMMUNICATION SYSTEMS

B.B. Saidov, I. Sadullo, N.B. Khuseinzoda

This study presents the modeling and investigation of artificial neural networks (ANNs) aimed at predicting the parameters of radio signals with different spectral densities. The architectures ADALINE, Focused Linear Network (FLN), and Nonlinear Autoregressive Network (NARX), implemented in the MATLAB Neural Network Toolbox environment, were used. A detailed analysis of one-step and multi-step forecasting was carried out using error functionals (RMS, MAE, MPE). Special attention is given to the application of the obtained results in intelligent data processing for fifth-generation (5G) wireless communication systems, where radio signal forecasting enhances adaptive resource allocation efficiency, reduces transmission delay, and optimizes modulation parameters. The simulation results show that the accuracy and stability of neural network forecasting depend on the spectral complexity of the signal and the parameters of the learning algorithm. The FLN architecture demonstrated the best balance between learning speed and prediction accuracy, while the ADALINE model showed high stability for narrowband signals. The findings can be applied to the prediction of radio channel parameters in intelligent 5G communication systems, where neural network algorithms can improve adaptive resource allocation, reduce latency, and enhance channel robustness under dynamic propagation conditions.

Keywords: artificial neural networks, signal forecasting, ADALINE, 5G, radio channel.

Введение

Прогнозирование временных рядов и сигналов остаётся одной из ключевых задач современной науки и техники. В радиотехнических системах методы прогнозирования находят применение при экстраполяции координат движения целей на этапе вторичной обработки информации, при моделировании случайных процессов в радиолокационных приёмниках, а также при оценке параметров нелинейных компонентов и узлов [1].

Развитие аппаратной базы современных устройств, характеризующихся сверхвысоким быстродействием, предъявляет повышенные требования к эффективности алгоритмов и структур обработки сигналов [2]. Для решения задач такого класса всё большую актуальность приобретают искусственные нейронные сети (ИНС), обладающие возможностью параллельной обработки данных и построения нелинейных моделей любой степени сложности. Применение ИНС позволяет отказаться от

необходимости явного аналитического описания моделируемого процесса, что существенно упрощает реализацию прогностических систем при сохранении высокой точности прогнозирования [3–9].

Для реализации моделирования и исследования свойств искусственных нейронных сетей применялась программная среда MATLAB с использованием встроенного инструментария для нейросетевого анализа.

Использование данного пакета оправдано как с методологической, так и с практической точки зрения, поскольку MATLAB обеспечивает высокий уровень вычислительной точности и удобные инструменты интеграции с другими модулями анализа данных и цифровой обработки сигналов (DSP Toolbox, Signal Processing Toolbox и др.). Это делает Neural Network Toolbox универсальной платформой для реализации и исследования алгоритмов прогнозирования в задачах радиотехники, обработки сигналов и технической диагностики [10].

1. Применение MATLAB Neural Network Toolbox для прогнозирования сигналов в интеллектуальных беспроводных системах связи 5G

Среда MATLAB Neural Network Toolbox представляет собой мощную платформу для построения, обучения и анализа искусственных нейронных сетей, широко применяемую в задачах прогнозирования сигналов и интеллектуальной обработки данных. Она содержит обширный набор архитектур нейросетей, алгоритмов адаптации и оптимизации, а также специализированные инструменты цифровой обработки сигналов, что делает её эффективным инструментом для моделирования систем прогнозирования в современных телекоммуникационных технологиях, включая сети пятого поколения (5G) [11].

Особенностью современных 5G-сетей является высокая динамичность радиосреды, связанная с изменением характеристик канала в реальном времени. В таких условиях применение нейросетевых методов прогнозирования обеспечивает возможность адаптивного управления радиоресурсами, включая распределение полосы частот, коррекцию мощности передачи и компенсацию искажений сигнала. Для достижения высокой точности прогноза требуется устойчивость модели к шумам и возможность быстрой адаптации к изменению статистики входных данных — эти свойства были исследованы для выбранных архитектур нейросетей [12–15].

Для оценки достоверности прогностической модели процесс моделирования выполнялся на двух множествах данных — обучающем и верификационном. На этапе обучения нейронная сеть формировала зависимости между параметрами входного и выходного сигнала, моделируя процесс передачи данных в динамически изменяющемся радиоканале.

В процессе обучения наблюдался характерный эффект переобучения, проявляющийся в росте ошибки на контрольной выборке при снижении её на обучающем множестве. Для предотвращения этого явления использовался параметр *maxfail*, ограничивающий число последовательных увеличений ошибки. Это обеспечивает достижение оптимального соотношения между скоростью сходимости и устойчивостью прогноза, что критически важно для низкозадержанных систем связи 5G, где прогноз радиоканала должен выполняться в реальном времени [16].

На втором этапе проводилась верификация модели — прогноз выходного сигнала на независимом тестовом множестве. Если среднеквадратичное отклонение (СКО) не превышало допустимого порога, модель считалась адекватной. Для повышения объективности применялись дополнительные критерии ошибок: MAPE, CAO, SSE и СПО. Показатели CAO и СПО позволяли количественно оценить степень отклонения и смещения прогноза, при этом значение СПО не превышало 5 %, что соответствует требованиям структурной точности прогностических систем в 5G.

Таким образом, использование нейросетевых моделей прогнозирования на основе MATLAB Neural Network Toolbox обеспечивает эффективную платформу для интеллектуального анализа и адаптивного управления радиопередачей в системах пятого поколения (5G). Это направление открывает возможности для реализации предсказательных алгоритмов управления мощностью, адаптации модуляции и оптимизации распределения спектра в реальном времени, что является ключевым фактором повышения пропускной способности и надёжности сетей нового поколения.

Для количественной оценки среднего абсолютного отклонения используется следующая математическая модель:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|, \quad (1)$$

где n – количество элементов входного вектора, подаваемого в нейронную сеть;

e_i – погрешность i -го дискретного отсчёта сигнала

Показатель среднего процентного отклонения (СПО) определяется следующим выражением:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{y_i} \cdot 100 \% \quad (2)$$

где y_i – выход ИНС для i -го отсчета. Средний процент ошибки (СПО) характеризует степень отклонения прогностической модели от реальных данных; допустимый порог данного показателя не должен превышать 5 %. [16].

2. Оптимизация входных данных нейронных сетей для прогнозирования характеристик радиоканала в системах 5G

Поскольку большинство нелинейных функций активации (ФА) имеют области насыщения, при достижении которых выход нейрона перестаёт изменяться, необходимо предварительно масштабировать входные данные. Для этого входной вектор нормируется в диапазоне $[-1; 1]$, что обеспечивает работу нейронов в линейной области активационной функции и предотвращает потерю чувствительности модели к изменениям входного сигнала [12].

Дополнительно выполняется центровка данных — приведение выборки к нулевому среднему значению. Несоблюдение данного условия приводит к смещению весовых коэффициентов нейронов и, как следствие, к возникновению эффекта «зацикливания» адаптационного процесса на локальных экстремумах.

Следующим этапом является декорреляция признаков входного вектора, направленная на устранение взаимозависимости между параметрами. Нормализация и декорреляция данных обеспечивают более эффективное обучение сетей, минимизируя переобучение и ускоряя сходимость алгоритмов адаптации при работе с большими потоками данных, характерными для 5G-сетей. Применение этих методов позволяет повысить точность прогнозирования параметров радиоканала, таких как уровень сигнала, коэффициент ошибок передачи (BER) и задержка (latency), что, в свою очередь, способствует оптимизации распределения радиоресурсов и повышению пропускной способности сетей нового поколения.

3. Модель адаптивного линейного нейрона и её применение для прогнозирования сигналов в 5G

Для демонстрации функциональных возможностей разработанного программного комплекса в среде MATLAB была реализована модель адаптивного линейного нейрона (ADALINE) (см. рисунок 2). В качестве входных данных использовались временные реализации радиосигнала, моделирующие изменение амплитудно-частотных характеристик радиоканала в системе беспроводной связи 5G.

В рамках эксперимента задавались следующие параметры моделирования:

- алгоритм адаптации — дельта-правило (Δ -rule);
- порог минимального среднеквадратичного отклонения аппроксимации - 10^{-4} ;
- скорость обучения (learning rate) — 0,3;
- количество циклов адаптации — 10;
- объём обучающей выборки — 4300 отсчётов;
- объём посттестовой (верификационной) выборки — 1600 отсчётов;
- число элементов линии задержки - 5.

Такая конфигурация позволяет оценить способность модели ADALINE к устойчивой сходимости и точному прогнозированию временных последовательностей, характеризующих состояние 5G-радиоканала. Полученные результаты могут быть использованы для последующей разработки нейросетевых модулей адаптивного управления мощностью, выбора схем модуляции и прогнозирования качества связи в сетях пятого поколения.

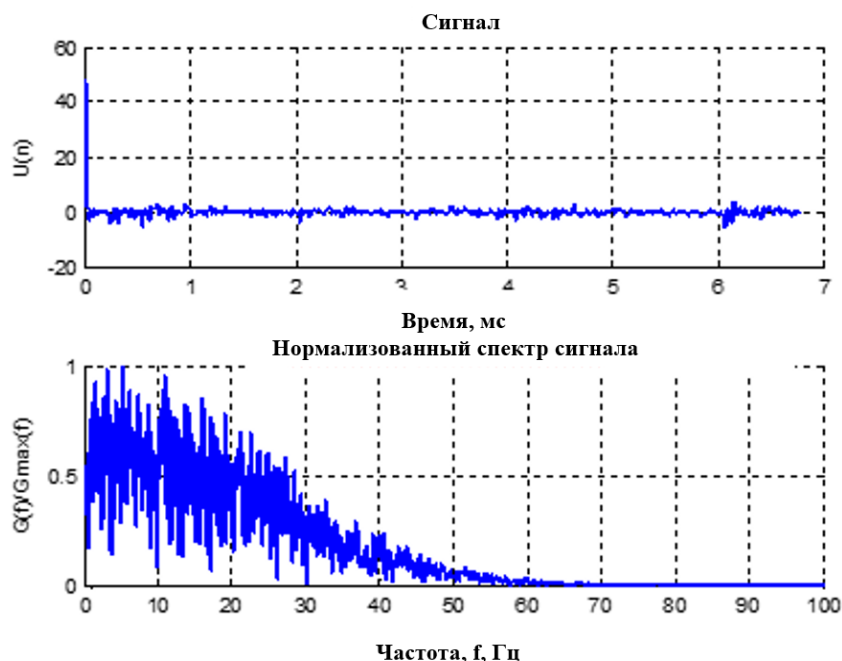


Рисунок 1 – Радиосигнал 1-го типа и распределение его мощности по частотам

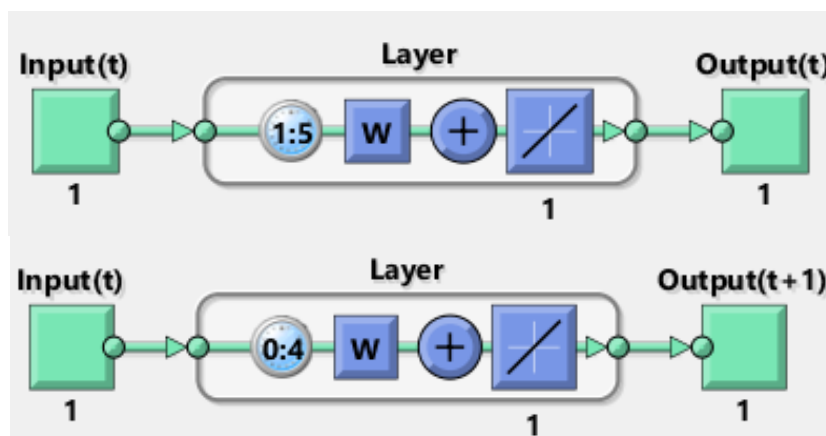


Рисунок 2 – Структура ADALINE в режимах обучения и прогнозирования

Сводные результаты обучения приведены в таблице 1. За 27 итераций нейронная сеть достигла требуемого уровня сходимости, обеспечив минимальное значение среднеквадратичного отклонения 10^{-4} .

Таблица 1 – Результаты моделирования процесса обучения нейрона ADALINE

Результаты обучения		
Время обучения, с	Количество итераций	Минимальное значение функции ошибки
185.7123	27	9.983163e-05
Показатели точности прогнозирования на тестовой выборке		
Ошибки прогноза для тестового множества (1-й нейрон)		
САО	СКО	СПО
6.996076e-02	8.373748e-03	-22.07 %

На рисунке 3 представлена динамика изменения среднеквадратичной ошибки (СКО) в процессе обучения нейронной сети, отражающая постепенное улучшение качества аппроксимации с ростом числа эпох. Рисунок 4 демонстрирует аппроксимацию исходного обучающего радиосигнала, тогда как рисунок 5 отображает результат прогноза на основе сформированной модели. Анализ тестовой выборки (рис. 2.7)

выявил некоторое снижение точности предсказания по сравнению с обучающей выборкой, что объясняется влиянием шумовых составляющих радиоканала и ограниченной способностью сети к обобщению.

Данное поведение модели характерно для систем интеллектуальной обработки сигналов в беспроводных сетях 5G, где высокая динамичность радиосреды и частые флуктуации уровня сигнала требуют адаптивных алгоритмов прогнозирования. Понимание закономерностей изменения ошибки обучения и деградации точности на тестовой выборке позволяет оптимизировать параметры нейросетевой архитектуры для повышения точности предсказания характеристик канала связи и улучшения устойчивости соединения в реальных условиях эксплуатации сетей нового поколения.

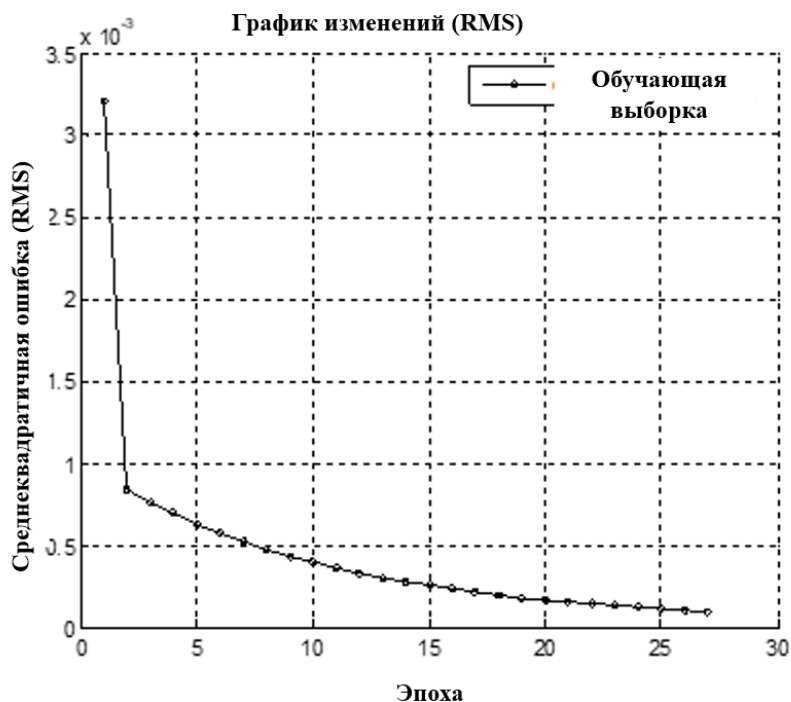


Рисунок 3 – Изменение среднеквадратичной ошибки в процессе обучения модели прогнозирования радиоканала 5G

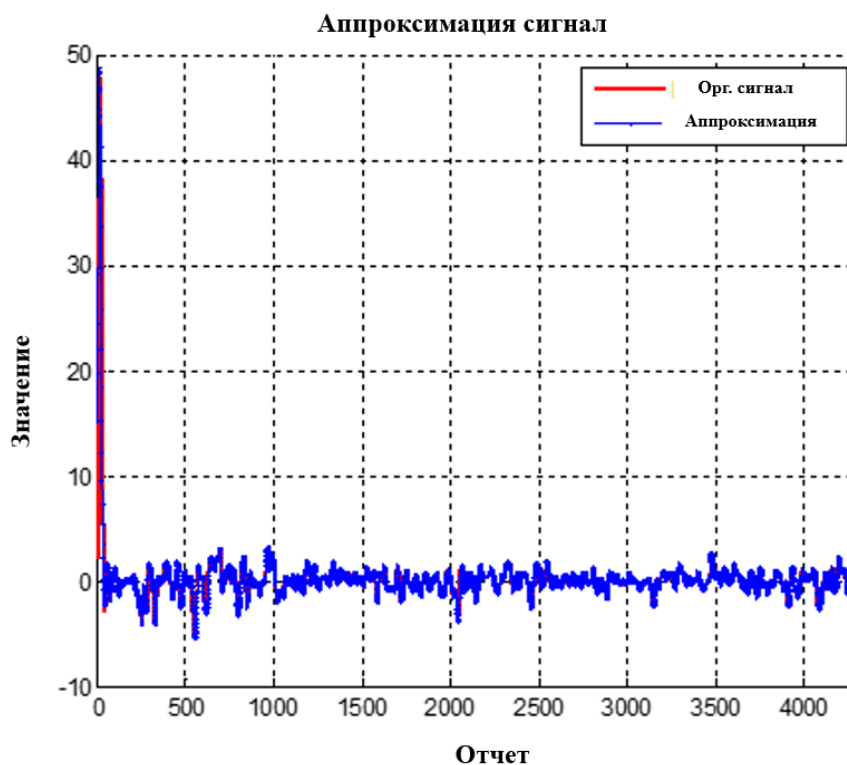


Рисунок 4 – Аппроксимации сигнала на этапе обучения модели, использующейся для прогнозирования параметров радиоканала 5G



Рисунок 5 – Прогноз обучающего сигнала при моделировании радиоканала 5G

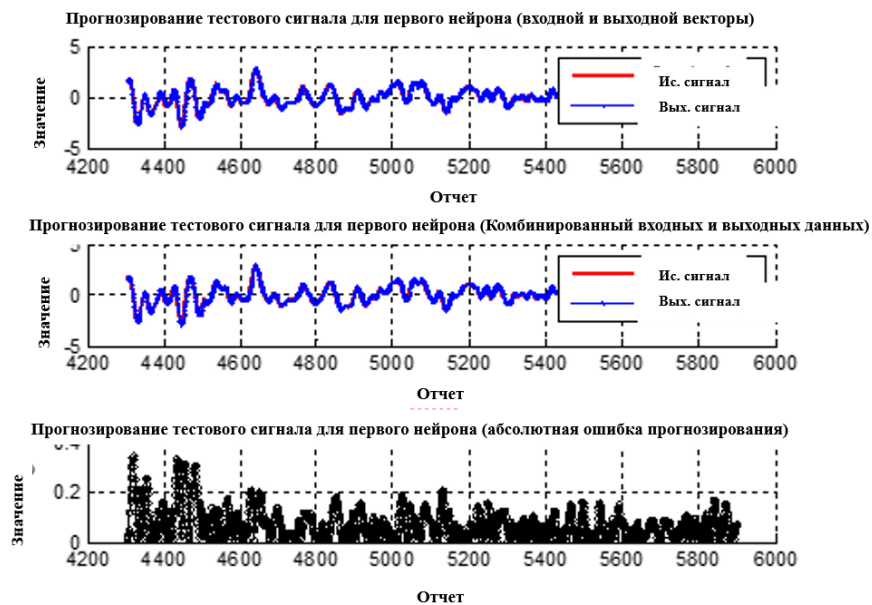


Рисунок 6 – Прогноз тестового радиосигнала и показано, как распределяется ошибка при моделировании канала 5G

4. Модель линейной сети и её применение для прогнозирования сигналов в 5G

Для демонстрации работы разработанной нейросетевой модели проведено моделирование линейной сети, ориентированной на одношаговое прогнозирование параметров радиосигнала, характерных для систем связи пятого поколения (5G). Моделирование выполнено в среде MATLAB с использованием стандартных параметров алгоритма обучения: метод Левенберга–Марквардта (ЛМ), скорость обучения — 0,01, объём обучающей выборки — 4300 отсчётов, верификационной — 1600 отсчётов. Распределение данных осуществлялось последовательно. Архитектура сети включала 15 скрытых нейронов, два выходных (для прогноза двух временных отсчётов) и 5 элементов задержки, формирующих временной контекст входного сигнала.

Такая модель позволяет воспроизводить динамику изменения радиосигнала с высокой временной разрешающей способностью и использовать прогнозные значения для адаптивного управления параметрами радиоканала 5G, включая выбор модуляции, регулирование мощности и предсказание деградации сигнала. Реализация подобной архитектуры способствует повышению устойчивости соединения и эффективности распределения спектральных ресурсов в условиях изменяющейся радиосреды.

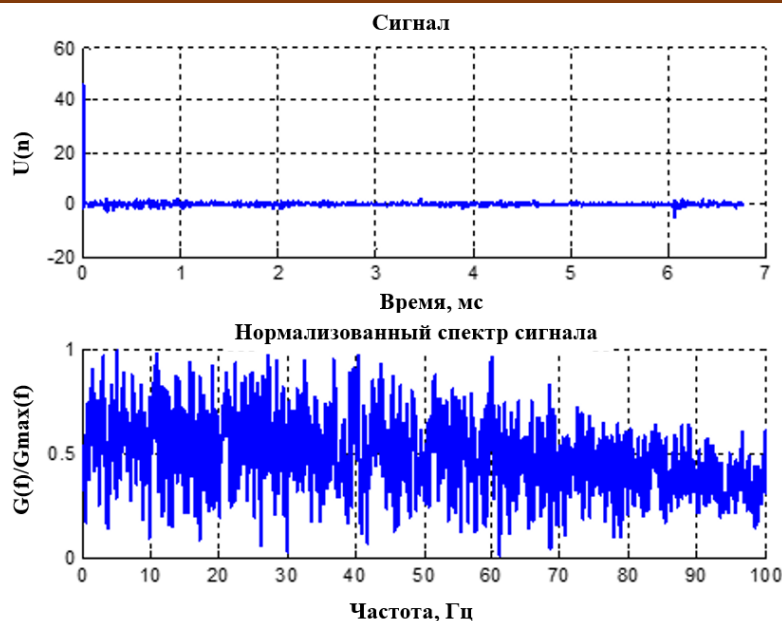


Рисунок 7 – Радиосигнал второго типа и его распределение мощности по частотам в системе 5G

Таблица 2 – Итоги обучения линейной нейросети и полученные прогнозы сигналов для модели радиоканала 5G

Результаты обучения нейросетевой модели				
Время обучения (секунд)	Количество итераций	Причина останова	Значение градиента	Значение параметра минимизации
30.312000	99	Validation stop	5.797341e-03	7.421479e-03
Ошибки прогноза, выявленные на тестовом множестве данных				
Ошибки прогноза для тестового множества (1-й нейрон)				
CAO	СКО		СПО	
2.443811e-02	1.208999e-03		-59.46 %	
Ошибки прогноза для тестового множества (2-го нейрон)				
CAO	СКО		СПО	
7.693391e-02	1.166122e-02		192.69 %	

На рисунке 8 представлено окно обучения, отображающее архитектуру нейронной сети до и после удаления задержки, что позволяет проанализировать влияние временных зависимостей на качество прогнозирования радиосигналов. Рисунки 2.9–2.11 отражают процесс обучения модели, где наблюдается устойчивая сходимость алгоритма и высокая точность аппроксимации радиосигнала, характерного для систем связи пятого поколения.

Рисунки 9 и 10 демонстрируют выходные сигналы нейронов и распределение ошибок прогнозирования. Различие значений СПО указывает на неодинаковую чувствительность выходных узлов к изменениям амплитуды и фазы входных данных.

Полученные результаты подтверждают эффективность нейросетевого подхода при прогнозировании параметров радиоканала в сетях 5G, обеспечивая адаптивность и высокую точность при обработке динамичных сигналов.

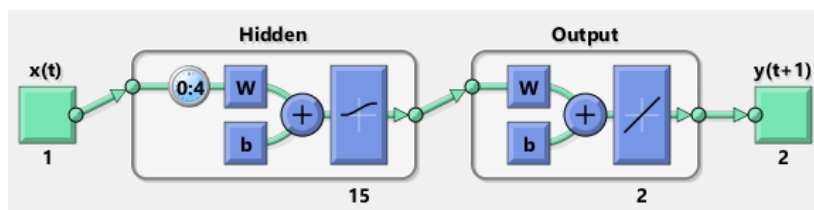


Рисунок 8 – Вид сети после исключения звена задержки (отображено в нижнем окне).

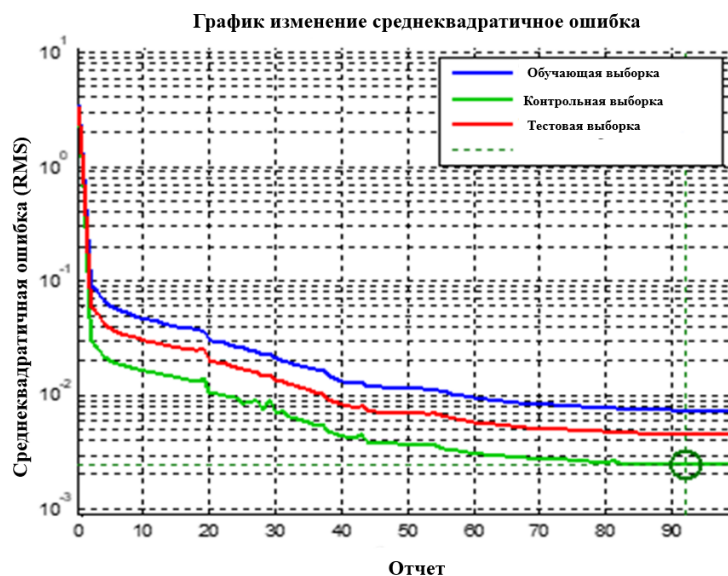


Рисунок 9 – Изменение значения СКО в процессе обучения

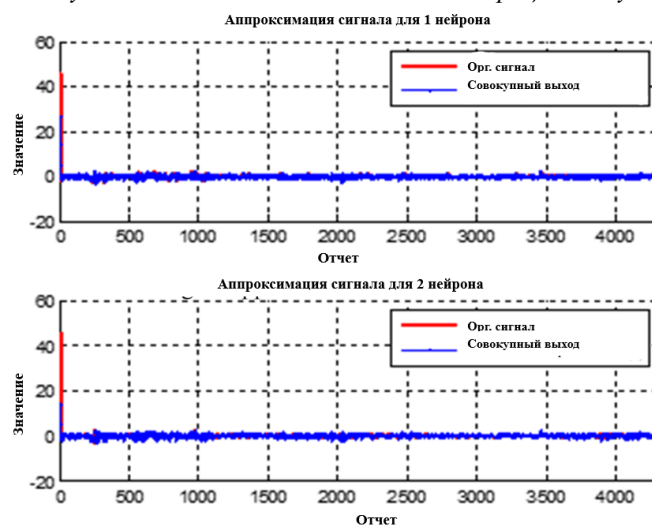


Рисунок 10 – Результат аппроксимации обучающего сигнала

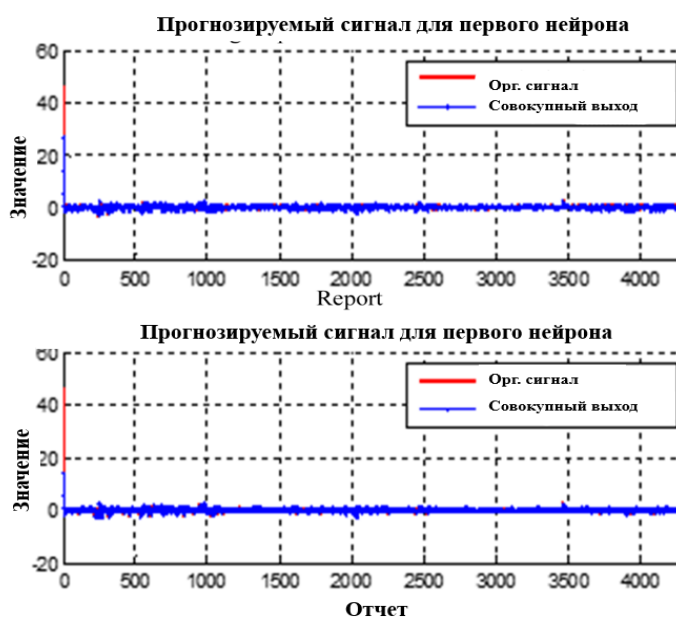


Рисунок 11 – Результат прогноза обучающего сигнала

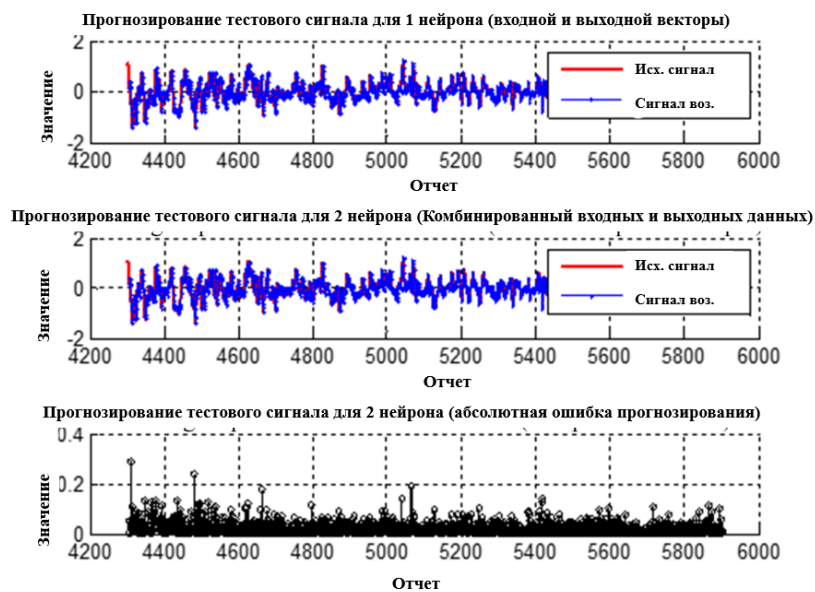


Рисунок 12 – Прогноз тестового сигнала (выход первого нейрона)

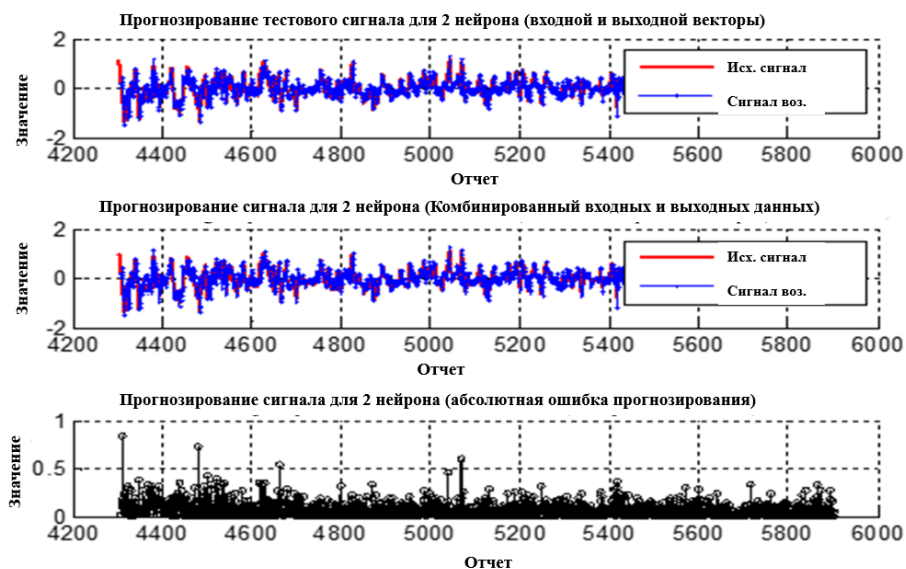


Рисунок 13 – Прогноз тестового сигнала (выход второго нейрона)

Из полученных данных видно, что обучаемая нейросеть работала ровно: она сходилась и вела себя стабильно. По графикам СКО хорошо видно, что выбранный алгоритм обучения и настройки сети подобраны удачно. Модель довольно точно повторяет и аппроксимирует обучающие сигналы, то есть правильно воспроизводит временную структуру радиосигнала. Это критично для 5G-систем, где нужно быстро и гибко обрабатывать данные в режиме реального времени.

На тестовых сигналах сеть тоже показала себя неплохо: она не потеряла способность обобщать, хотя на некоторых фрагментах сигнала ошибка немного возрастает. То, что значения СПО у разных нейронов отличаются, говорит о том, что выходы по-разному реагируют на изменения амплитуды и фазы. Это ожидаемо, потому что сам радиоканал ведёт себя нелинейно.

В целом, проведённое моделирование подтверждает целесообразность использования нейросетевых моделей для прогнозирования параметров радиосигналов в сетях 5G, обеспечивая адаптацию к изменениям спектральных характеристик канала и повышение устойчивости связи.

Заключение

В результате проведённых исследований реализован полный цикл моделирования искусственных нейронных сетей для прогнозирования радиосигналов различной природы. Определены зависимости точности прогнозирования от архитектуры нейросети и параметров спектральной плотности сигнала.

Установлено, что при увеличении числа гармонических составляющих не все типы сетей обеспечивают достижение оптимального значения критерия структурной точности (STR). Наиболее устойчивые результаты продемонстрировала модель ADALINE при работе с узкополосными сигналами, в то время как архитектуры FLN и NARX показали преимущества при прогнозировании сложных, нелинейных зависимостей.

Связь полученных результатов с технологиями 5G заключается в возможности применения исследованных нейросетевых алгоритмов для:

- прогнозирования параметров радиоканала (SNR, задержка, BER);
- динамического управления мощностью передачи;
- адаптивного выбора модуляции и кодирования в системах 5G NR;
- интеллектуального распределения радиоресурсов на уровне базовых станций и пользовательских устройств.

Таким образом, использование нейросетевых методов прогнозирования открывает перспективы повышения эффективности и устойчивости каналов передачи данных в сетях пятого и шестого поколений (5G/6G), обеспечивая реализацию концепций самоорганизующихся и предсказательных сетей нового поколения.

Рецензент: Давлатшоев С.К. — к.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ИВТ, ТЭиЭ НАНТ.

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 мультимедийной осевой антенны для передачи и приема информации / Б.Б. Саидов, И. Саъдулло, Д.А. Абдурасулов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. - 2024. - № 3(67). - С. 42-48.
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. Xu, B. Power density measurements at 15 GHz for RF EMF compliance assessments of 5G user equipment / B. Xu, K. Zhao, B. Thors, D. Colombi, O. Lundberg, Z. Ying, and S. He // IEEE Trans. Antennas Propag., - vol. 65. - no. 12. - P. 6584–6595.
15. Pawlak, R. On measuring electromagnetic fields in 5G technology / R. Pawlak, P. Krawiec and J. Zurek // IEEE Access. - vol. 7. - 2019. - P. 29826–29835.

16. Telezhkin V. Prediction of signals in control systems based on fuzzy time series / V. Telezhkin, A. Ragozin, B. Saidov // Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. – 2021. – P. 950–954.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН — СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ — INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Саидов Бехруз Бадридинович	Саидов Бехруз Бадридинович	Saidov Behruz Badridinovich
н.и.т.	к.т.н	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		
TJ	RU	EN
Исфандиёри Саъдулло	Исфандиёри Саъдулло	Isfandiyori Sadullo
Докторанти PhD	PhD докторант	PhD student
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: isadullo@teleradiocom.tj		
TJ	RU	EN
Ҳусейнзода Насимҷон Бурихон	Хусейнзода Насимҷон Бурихон	Huseynzoda Nasimjon Burikhon
Докторанти PhD	PhD докторант	PhD student
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: huseynzoda@mail.ru		