

Модели компонент приемопередающих устройств на основе слоев нейронных сетей для системы связи с цифровым уплотнением поднесущих

О.С. Сидельников^{1,*}, А.А. Редюк¹, М.П. Федорук¹, С.К. Турицын²

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

² Институт фотонных технологий, университет Астона, г. Бирмингем, Англия

* E-mail: o.sidelnikov@g.nsu.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.99-100

Растущий спрос на пропускную способность стимулирует исследование новых технологий для высокоскоростных телекоммуникационных систем [1]. В настоящее время интенсивное развитие получают такие технологии, как эрбиевые усилители, спектральное уплотнение каналов, новые форматы модуляции, когерентное детектирование, цифровая обработка сигналов и др. Однако по мере роста числа спектральных каналов в сигнале и при использовании форматов модуляции более высокого порядка появляются новые искажения, вносимые в сигнал при его генерации и обработке в приемо-передающих устройствах линии связи. Одним из подходов для компенсации таких искажений является разработка алгоритмов предкомпенсации сигнала в передатчике линии связи на основе методов машинного обучения [2]. Для эффективного обучения таких алгоритмов необходимо представить всю телекоммуникационную систему в виде глубокой нейронной сети (НС), допускающей обратное распространение градиента функции ошибки. В данной работе мы разрабатываем модели компонент передатчика и приемника в виде обучаемых слоев нейронных сетей. Данные модели учитывают физические принципы, лежащие в основе исследуемых устройств.

В работе исследовалась телекоммуникационная система с цифровым уплотнением поднесущих [3] без оптического волокна, состоящая из следующих компонент приемопередающих устройств: модулятор Маха-Цендера (MZM), цифро-аналоговый преобразователь (DAC), драйвер модулирующего сигнала (DRV) когерентный приемник (ICR), трансимпедансный усилитель (TIA) и аналого-цифровой преобразователь (ADC). Кроме того, система связи содержала блоки цифрового мультиплексирования и демultipлексирования, использующиеся для объединения и разделения частотных каналов, а также блок цифровой обработки сигналов. Рассматривалось распространение цифровых многополосных 64-QAM сигналов с 8 спектральными каналами.

Для каждой компоненты приемопередающих устройств были определены математические модели, которые описывают распространение сигналов через них. Следует отметить, что в рассматриваемой системе нелинейные искажения в сигнал вносит только модулятор Маха-Цендера, в то время как DAC, DRV, TIA и ADC изменяют только мощность и спектр передаваемого сигнала. Кроме того, DAC дополнительно вносит квантовый шум при квантовании сигнала, зависящий от числа используемых бит в устройстве. Для разработки моделей исследуемых компонент в работе были рассмотрены нейронные сети с комплекснозначной арифметикой, основанные на сверточных и полносвязных архитектурах.

Первой исследовалась структура на основе свёрточных НС. Для данной структуры были разработаны слой, квантизирующий проходящий через него сигнал, для моделирования DAC и блоки, повышающие и понижающие частоту дискретизации. Кроме того, был добавлен нелинейный слой, соответствующий

нелинейному отклику MZM. На основе входных и выходных многоканальных сигналов, полученных из аналитических моделей компонент передатчика и приемника, было выполнено совместное обучение всех слоев полученной структуры. Эффективность разработанных моделей оценивалась как нормированная среднеквадратичная ошибка (NMSE) между сигналом, полученным на выходе нейронной сети, и результатом аналитических моделей. На Рис. 1 слева представлена зависимость NMSE от числа коэффициентов на сверточных слоях для описанной структуры на основе свёрточных НС. Как мы можем видеть сверточные слои с более чем 31 коэффициентом обеспечивают NMSE менее -51 дБ, а дальнейшее увеличение ширины фильтра приводит лишь к небольшому изменению результатов.

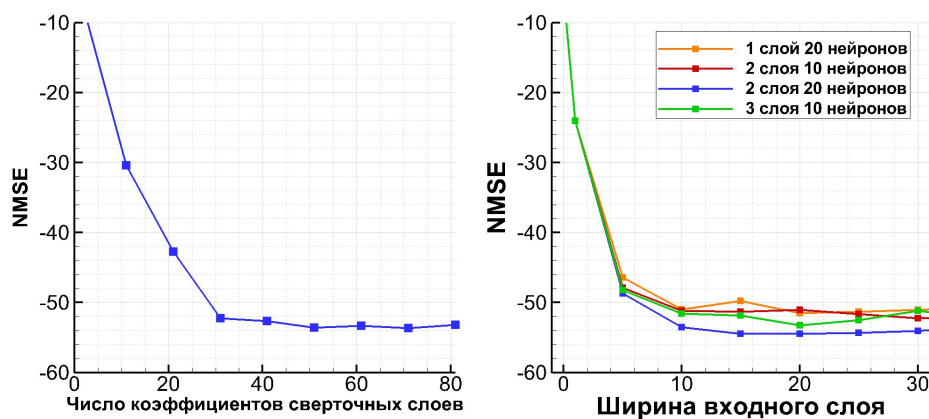


Рис. 1. Зависимость NMSE от числа коэффициентов сверточного слоя для сверточных НС (слева) и зависимость NMSE от ширины входного слоя для полносвязных НС (справа).

Далее исследовались полносвязные НС с комплекснозначной арифметикой. Во входном слое располагался один нейрон, но подавалась последовательность предыдущих и последовательных символов для учета эффекта памяти канала. В скрытых слоях число нейронов варьировалось. Для данных структур была дополнительно реализована комплексная функция активации с кубической нелинейностью, а также использовался разработанный квантизирующий слой. На Рис. 1 справа представлена зависимость NMSE от ширины входного слоя для полносвязных НС с различным числом нейронов и скрытых слоев. Видно, что все рассмотренные архитектуры демонстрируют схожие результаты. Кроме того, все полносвязные НС с входным слоем шириной более чем 10 обеспечивают $NMSE \leq -50$.

Следует отметить, что полученный уровень ошибки соответствует высокой точности моделирования искажений приемопередающих устройств. Полученные схемы могут использоваться в качестве идентификационных моделей передатчика и приемника при разработке алгоритмов предкомпенсации сигнала.

Работа Федорука М.П. (теоретический анализ) поддержана проектом РНФ № 20-11-20040. Работа Сидельникова О.С. и Редюка А.А. (математическое моделирование) выполнена за счет средств гранта, предоставленного Новосибирскому государственному университету для реализации программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

Литература

- [1] Temprana E., Myslivets E. et al., *Science*. 2015. **348**, P. 1445-1448 (2015)
- [2] Paryanti G., Faig H. et al, *J. Lightwave Technology*, **38**, 3883–3896 (2020).
- [3] Qiu M., Zhuge. Q. et al, *Opt. Express*, **22**, 18 770–18 777 (2014).