

ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО КАНАЛА СВЯЗИ СИСТЕМЫ ММО-OFDM НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Рассмотрен алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в условиях сложного канала связи системы ММО-OFDM на основе нейронной сети. С ростом и развитием сетей передачи данных возрастают как количество пользователей (приемников), так и число базовых станций (передатчиков), что ведет к тому, что происходит сильное усложнение условий для передачи и приема сигналов, а формируемые каналные матрицы с ростом числа антенн также увеличиваются в размерах, что ведет к ужесточению требований касаясь вычислительной сложности алгоритма обработки и приема сигналов. Один из способов решить эту проблему – увеличение скорости работы алгоритмов обработки при том же или даже лучшем качестве работы. В последние годы активно развиваются различные алгоритмы, основанные на нейронных сетях, и их применение в тех или иных областях науки и техники показывает отличные результаты с меньшей вычислительной сложностью и более высокой точностью.

В настоящей работе предложены различные модификации алгоритма на основе нейронной сети, увеличивающие его точность, проведено сравнение работы алгоритма и его модификаций с различными классическими методами. Показано, что предложенные модификации увеличивают точность алгоритма.

ММО-OFDM, цифровой алгоритм, нейронная сеть, сложный канал связи, частота ошибки битов, пространственно-временной сигнал, приемник.

Fedosov Valentin Petrovich, Tsirkulenko Artemy Viktorovich

DIGITAL ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIO-TEMPORAL SIGNALS IN CONDITIONS OF A COMPLEX COMMUNICATION CHANNEL OF THE MIMO-OFDM SYSTEM BASED ON A NEURAL NETWORK

An algorithm for processing spatio-temporal signals under conditions of a complex communication channel of the MIMO-OFDM system based on a neural network is considered. With the growth and development of data transmission networks, both the number of users (receivers) and the number of base stations (transmitters) increase, which leads to the fact that the conditions for transmitting and receiving signals become very complicated, and the formed channel matrices also increase with the increase in the number of antennas in size, which leads to stricter requirements regarding the computational complexity of the algorithm for processing and receiving signals. One way to solve this problem is to increase the speed of processing algorithms with the same or even better quality of work. In recent years, various algorithms based on neural networks have been actively developed, and their application in various fields of science and technology shows excellent results with less computational complexity and higher accuracy.

This paper proposes various modifications of the algorithm based on a neural network, increasing its accuracy, and compares the operation of the algorithm and its modifications with various classical methods. It is shown that the proposed modifications increase the accuracy of the algorithm.

MIMO-OFDM, digital algorithm, neural network, complex communication channel, bit error rate, space-time signal, receiver

Введение

На текущий момент в радиотехнике существует множество различных алгоритмов обработки и приема сигналов, при этом с ростом количества базовых и мобильных станций возникают новые вызовы, связанные с созданием новых программных алгоритмов с меньшей вычислительной сложностью и хорошим выигрышем даже в условиях применения в каналах со сложными условиями (например, в плотной городской застройке). Классические алгоритмы приема сигналов в ММО имеют как достоинства, так и различные недостатки [1, 2, 3]. Среди классических алгоритмов особый интерес представляют адаптивные алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов [4, 5] и иные

алгоритмы, предложенные исследователями ММО-OFDM систем (в частности, в зарубежных исследованиях).

При этом главные недостатки некоторых из этих алгоритмов – это высокая вычислительная сложность и недостаточная точность при их применении в сложных высокореллированных (по времени и частоте) каналах связи.

Постановка задачи

Математическая модель сигнала, улавливаемого приемником, может быть сформулирована следующим образом:

$$y = Hx + n, \quad (1.1)$$

где y – вектор принимаемого сигнала размером N_r , H – матрица канала размером $N_r \times N_t$, x – передаваемый передатчиком сигнал размера N_t , n – аддитивный квазибелый (полоса шума шире полосы приемника) гауссов шум размера N_r с некоторой заданной дисперсией σ^2 .

Цель приемника – найти такую оценку \check{x} передаваемого вектора x , которая минимизировала бы следующее соотношение:

$$\check{x} = \arg \min \|y - Hx\|_2, \quad (1.2)$$

Описание базового алгоритма на основе нейронной сети

Для независимых и одинаково распределенных канальных матриц предлагается следующая структура одного слоя нейронной сети MMNet:

$$z_t = \check{x}_t + \theta_t^{(1)} H^H (y - H\check{x}_t), \quad (1.3)$$

$$\check{x}_{t+1} = \eta(z_t, \sigma_t^2). \quad (1.4)$$

То есть сигнал последовательно проходит сквозь линейный и нелинейный обучаемые компоненты. Причем для нелинейного компонента дисперсия входного шума оценивается как:

$$\sigma_t^2 = \frac{\theta_t^{(2)}}{N_t} \left(\frac{\|I - A_t H\|_F^2}{\|H\|_F^2} \left[\|y - H\check{x}_t\|_2^2 - N_r \sigma^2 \right] + \frac{\|A_t\|_F^2}{\|H\|_F^2} \sigma^2 \right), \quad (1.5)$$

Нейронная сеть MMNet собирается из нескольких слоев T . В качестве метрики средним значением для всех слоев является метрика в пространстве L_2 – потеря при обучении модели:

$$L = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \|\check{x}_t - x\|_2^2. \quad (1.9)$$

Описание модификаций и экспериментальных исследований

Ниже представлена архитектура MMNet-2.

В ходе экспериментов было решено немного модифицировать формулу для нелинейного компонента следующим образом:

$$\check{x}_{t+1} = \theta_t^{(3)} [\eta(z_t, \sigma_t^2) + \theta_t^{(4)}], \quad (1.10)$$

Следующим пунктом улучшения являются начальные приближения. В качестве модификации была предложена формула Ксавье [6] для начальных приближений, в которой они распределены по равномерному закону.

Другая гипотеза заключалась в том, что использование множественного оценщика на выводе может дать некоторый выигрыш за счет уменьшения дисперсии погрешности.

При проведении экспериментов были заданы параметры канала связи и нейронной сети соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1.

Параметры нейронной сети

Общее число слоев	10
Общее число эпох для обучения по времени	1000
Общее число эпох для обучения по частоте	9
Число образцов в пакете при обучении	500
Чувствительность оптимизатора	0.001
Вид оптимизатора	Адам
Число обучаемых точек ОСШ	4

Таблица 2.

Параметры системы связи

Вид модуляции	QAM-4
Число антенн передатчика	16
Число антенн приемника	64
Число символов во временной области	4
Число поднесущих в частотной области	48

На рис. 1 показаны результаты моделирования и усреднения алгоритмов на основе нейронной сети MMNet и ее модификаций по каналу связи с нормальным числом обусловленности, созданного с помощью симулятора QuaDRiGa. Использовалась реализация канала BERLIN_UMa_LOS_seed22 [7]. Эта 3D модель канала была получена в результате измерений в Берлине (Германия) параметров наземных городских ячеек большого размера (до нескольких километров). Компонента прямой видимости присутствует.

При этом было проведено сравнение с такими алгоритмами, как QRD SIC [8], QRD+K-best-8 [9], MMSE, cLLL [10]+MMSE, cLLL+QRD. Кодирование не применяется. Под MMNet-2 понимается модификация MMNet со всеми изменениями, кроме множественной оценки, а в MMNet-2-10 используется усреднение по 10 оценщикам.

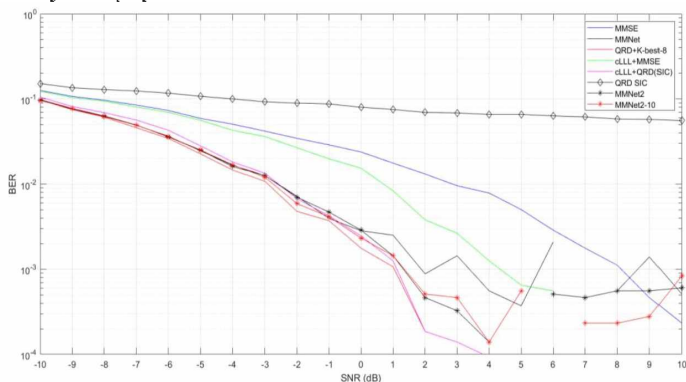


Рис. 1. Кривые BER для различных типов алгоритмов (QAM-4)

Выводы

Результаты моделирования показывают, что использование нейронных сетей в качестве основы для алгоритма приема сигналов способно обеспечивать достаточно низкую вероятность ошибки битов даже в условиях работы в реальном многопутном канале связи, при этом, внесение дополнительных модификаций способно еще сильнее улучшить эти результаты.

Среди существующих недостатков алгоритма следует выделить ограничение по минимальной частоте ошибок битов при высоких отношениях сигнал/шум. Этот вопрос планируется проработать в дальнейших исследованиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Emanuele Viterbo and Joseph Boutros*. A universal lattice code decoder for fading channels. *IEEE Transactions on Information theory*, 45(5):1639–1642, 1999.
2. *Shaoshi Yang and Lajos Hanzo*. Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):1941–1988, 2015.
3. *Erik G Larsson*. MIMO detection methods: How they work. *IEEE signal processing magazine*, 26(3), 2009
4. *Федосов В.П., Ломакина А.В.* Алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов. Учебное пособие. - Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. - 73 с.
5. *Легин А.А.* Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов для цифровой линии связи в среде с переотражениями – диссертация, 2019. - 167 с.
6. *Glorot, X., & Bengio, Y.* (2010). Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics* (Vol. 9, pp. 249-256).
7. *Jaeckel, S.* (2017). Quasi-deterministic channel modeling and experimental validation in cooperative and massive MIMO deployment topologies [Doctoral dissertation, Technische Universität Ilmenau]. *Digitale Bibliothek Thüringen*.
8. *Mao, Hongliang & Feng, Wei & Pei, Yukui & Ge, Ning.* (2013). SIC based soft QRD detection for coded single carrier block transmission with unique word. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*. 4348-4352. 10.1109/GLOCOM.2013.6831757.
9. *Guo, Zhan & Nilsson, Peter.* (2006). Algorithm and implementation of the K-best Sphere decoding for MIMO detection. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. 24. 491 - 503. 10.1109/JSAC.2005.862402.
10. *Gan, Ying & Ling, Cong & Mow, Wai Ho.* (2009). Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection. *Signal Processing, IEEE Transactions on*. 57. 2701 - 2710. 10.1109/TSP.2009.2016267.