

УДК 681.518:004.89

Перспективы применения методов краевого искусственного интеллекта для самодиагностики подводных волоконно-оптических усилителей

Алябьев К.А.¹, Козырев Д. В.¹, Гавенчук А.В.¹, Ахмеров А.Х.¹

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Дейнека И. Г.¹

¹Университет ИТМО

kostya_alayabev01@mail.ru

Введение

Объём данных, передаваемых с помощью различных сетевых технологий, сохраняет стабильную тенденцию к росту за счёт возникновения новых цифровых сервисов, которыми в настоящий момент являются Интернет вещей (IoT), 5G-A/6-G сети и центры обработки данных для искусственного интеллекта [7]. Основой магистральной инфраструктуры являются волоконно-оптические линии связи, по которым осуществляется передача большей части международного и междугороднего трафика. Одной из ключевых задач при построении новой и поддержании существующей инфраструктуры является задача повышения и поддержания надёжности в целях уменьшения количества внезапных отказов, аварийных отключений и среднего времени до восстановления. Для этих целей разрабатываются системы мониторинга и диагностики неисправностей для различных компонентов ВОЛС, которые можно подразделить на пассивные, включая само оптическое волокно, и активные (усилители, медиаконвертеры и пр.). Анализ современной литературы показывает, что тематика мониторинга состояния активно развивается, однако в большинстве работ рассматриваются методы постобработки и машинного обучения, реализация которых осуществляется методом облачных вычислений. В рамках данной работы исследуется перспектива создания системы самодиагностики волоконно-оптических усилителей (EDFA) с помощью краевого искусственного интеллекта.

Основная часть

Задача мониторинга состояния оптического волокна и иных пассивных компонентов ВОЛС сформулирована достаточно давно, в настоящий момент работы в большей степени посвящены оптимизации и адаптации существующих методов. Для обнаружения аномалий в ВОЛС, зачастую, применяются оптические рефлектометры (чаще всего OTDR), основанные на Рэлеевском рассеянии света. Интерпретация данных OTDR представляет собой сложную задачу в связи с искажениями сигнала из-за воздействий шумов различной природы. Поэтому значительная часть современных исследований сосредоточена на применении методов машинного обучения и искусственного интеллекта для повышения точностных характеристик в задачах локализации аномалий [1; 6]. Помимо этого, развиваются предсказательные методы, позволяющие определить наличие деградиационных процессов в волокне до момента критических сбоев. Отдельно следует выделить подход к построению систем прогнозирования отказов, основанных на интеграции показаний от нескольких анализирующих устройств разной природы: OTDR, OSA, NOC [8]. Также следует отметить развитие технологий, при которых функции диагностики неисправностей пассивных компонент ВОЛС переносятся на её функциональные элементы, например на оптические модули [7] и когерентные приёмопередатчики [2]. Причём в данных работах математические расчёты, в том числе глубоких нейронных сетей, осуществляются непосредственно на самом функциональном узле без использования сторонних вычислительных мощностей, то есть являются краевыми.

Вопросы диагностики неисправностей в активных компонентах ВОЛС сравнительно менее представлены в литературе. Задача управления отказами в оптоэлектронных приборах и устройствах в общем виде не сформулирована, однако существуют работы, в качестве объектов исследующие различные элементы оптических

сетей [3]. Волоконно-оптические усилители являются незаменимым компонентом для магистральных ВОЛС, причём создание систем диагностики неисправностей имеет особую важность для них в связи с удалённостью и труднодоступностью для ремонта и обслуживания. При анализе жизненного цикла оптических усилителей часть исследователей выделяет процесс деградации лазеров как ключевой фактор, влияющий на нормальное функционирование системы. Были продемонстрированы системы анализа данных с лазеров, позволяющие определять начало процесса деградации [4], его характеристику [1] и осуществляющие оценку остаточного времени жизни [5]. Однако современные волоконно-оптические усилители помимо лазеров накачки обладают другими элементами, деградация которых может влиять на функционал усилителя в целом: фотоприёмники, аттенуаторы, пассивные компоненты. Для обнаружения аномалий и оценки остаточного ресурса было разработано несколько специализированных алгоритмов машинного и глубокого обучения [10; 11; 9]. Актуальной задачей является краевая реализация существующих алгоритмов, т.е. внедрение функционала самодиагностики в блоки оптического усиления.

Выводы

В ходе исследования был проведён обзор существующих подходов по мониторингу волоконно-оптических линий связи. Также была обоснована актуальность разработки систем самодиагностики волоконно-оптических усилителей с применением КИИ.

Литература

1. Abdelli, K. Machine-learning-based anomaly detection in optical fiber monitoring // *Journal of Optical Communications and Networking*. 2022. Vol. 14. № 5. – P. 365.
2. Mazur, M. Real-Time Monitoring of Cable Break in a Live Network using a Coherent Transceiver Prototype // *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024 Optical Fiber Communication Conference*. – San Diego California: Optica Publishing Group, 2024. – P. Tu3J.6.
3. Wang, D. A review of machine learning-based failure management in optical networks // *Science China Information Sciences*. 2022. Vol. 65. № 11. – P. 211302.
4. Abdelli, K. Degradation Prediction of Semiconductor Lasers Using Conditional Variational Autoencoder // *Journal of Lightwave Technology*. 2022. Vol. 40. № 18. – P. 6213-6221.
5. Abdelli, K. Lifetime Prediction of 1550 nm DFB Laser using Machine Learning Techniques // *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2020. – P. 1-3.
6. Abdelli, K. Optical Fiber Fault Detection and Localization in a Noisy OTDR Trace Based on Denoising Convolutional Autoencoder and Bidirectional Long Short-Term Memory // *Journal of Lightwave Technology*. 2022. Vol. 40. № 8. – P. 2254-2264.
7. Chen, X. AI-Embedded Optical Modules With Millisecond-Granularity Power Analysis for Autonomous Metro Transport Network and Field Trial // *Journal of Lightwave Technology*. 2025. Vol. 43. № 22. – P. 10086-10093.
8. Farabi, S. A. Farabi S. A. AI-driven predictive maintenance model for DWDM systems to enhance fiber network uptime in underserved US regions // *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202506>. – 2025. – T. 1152. – C. v1.
9. Schneider, D. A Transformer-Based Approach for Diagnosing Fault Cases in Optical Fiber Amplifiers / D. Schneider, L. Rapp, C. Ament // *2025 25th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2025 25th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. – Barcelona, Spain: IEEE, 2025. – P. 1-4.
10. Schneider, D. Anomaly Detection in Time Series of EDFA Pump Currents to Monitor Degeneration Processes using Fuzzy Clustering / D. Schneider, L. Rapp, C. Ament // *2024 IEEE International Conference on Machine Learning for Communication and Networking (ICMLCN) / arXiv:2408.15268 [eess]*. 2024. – P. 454-459.