

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.16>

УДК: 535.417

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ФАЗЫ В КОГЕРЕНТНОМ ОПТИЧЕСКОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ

В.А. Яцеев, О.В. Бутов

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2023 г.

Аннотация. Работа направлена на решение задачи детектирования фазы в фазочувствительном рефлектометре при работе с стохастическими релеевскими отражателями в волокне. Предложено усовершенствование методов измерений в когерентных рефлектометрических системах, основанных на использовании алгоритмов машинного обучения на примере чирп-рефлектометра. Для сбора данных, необходимых для тренировки нейросетей, был использован чирп-рефлектометр с перестраиваемым по длине волны лазерным источником. В работе показано, что сканирование по длине волны позволяет имитировать различные внешние воздействия, такие как деформация или температура, на протяженных участках, обеспечивая тем самым эффективный сбор данных для обучения. Использование даже простых нейросетевых алгоритмов приводит к значительному увеличению точности измерения фазы, что показывает потенциал данного метода детектирования фазы сложных интерферометрических сигналов.

Ключевые слова: фазочувствительная рефлектометрия, OTDR, машинное обучение, детектирование фазы, рэлеевское рассеяние.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН.

Автор для переписки: Яцеев Василий Артурович, yatseev@gmail.com

Введение

Начиная с 70-х годов прошлого века, бурное развитие технологий волоконной оптики привело к значительным достижениям в сфере телекоммуникаций. Сенсорные волоконно-оптические технологии на основе принципов рефлектометрии [1,2] обрели широкое применение в многочисленных сферах, включая обеспечение безопасности трубопроводов [3], контроль за состоянием нефтяных скважин [4], мониторинг железнодорожного транспорта [5], авиации [6], а также в периметральных системах охраны [7]. Использование распределенных волоконно-оптических датчиков, базирующихся на принципах рефлектометрии дало возможность проводить высокоточные измерения на больших расстояниях вплоть до несколько сотен километров.

С течением времени акценты в области технологий сместились от базовых мониторинговых систем, дающих лишь общее представление о воздействиях на оптическое волокно, к разработке продвинутых измерительных комплексов с высокими метрологическими характеристиками, такими как фазочувствительная рефлектометрия. Важно отметить, что распределенные волоконно-оптические измерительные системы имеют уникальные характеристики, отличающие их от точечных систем. Одна из ключевых особенностей – это неоднородность свойств вдоль волокна, обусловленная стохастическим распределением релеевских отражателей в волокне.

Исследования, направленные на анализ и компенсацию этих неоднородностей, а также на разработку новых методов и алгоритмов для анализа поступающих данных, минимизации влияния стохастического распределения релеевских отражателей, необходимы для создания эффективных измерительных систем. Такие усовершенствования обещают улучшение

точности и надежности измерений в волоконно-оптических распределенных системах, там, где требуется точное синфазное детектирование с различных участков волокна, например, при обработке сейсмических сигналов или детектирование длительных медленных акустических воздействий с накоплением.

В последнее время активно развиваются методы анализа на основе искусственного интеллекта. Методы машинного обучения на сегодняшний день находят широкое применение в обработке больших объемов данных, например, в таких областях, как компьютерное зрение [8] и обработка естественного языка. Они представляют собой значительный прогресс в анализе и выявлении сложных зависимостей. Хотя применение этих методов в обработке данных от датчиков и сенсорных систем пока менее распространено (например [9]), их перспективность в сферах, где результаты измерений представляют собой сложносоставной набор данных, например, в стохастических сигналах, получаемых в рефлектометрических системах, не вызывает сомнений [10].

Целью данной работы является исследование возможности улучшения детектирования фазы в когерентной chirp-рефлектометрии с использованием алгоритмов машинного обучения, в частности нейросетей.

1. Рефлектометрия на основе Рэлеевского рассеяния.

Существуют несколько типов оптоволоконных рефлектометров, основанных на разных видах обратного рассеяния света. Однако самым универсальным и простым вариантом является когерентный рефлектометр [11], работающий на принципе интерференции сигналов от рэлеевских центров рассеяния внутри волокна.

В основе построения рефлектометрических систем лежат два ключевых подхода: Оптическая рефлектометрия во временной области (OTDR), Оптическая рефлектометрия в частотной области (OFDR) [12], а также смешанные системы [13]. Фазочувствительная, или когерентная рефлектометрия (ф-OTDR), характеризуется улучшенной чувствительностью к фазе сигнала [14].

Такой метод предпочтительнее в случаях использования больших измерительных длин. Общий принцип работы метода заключается в детектировании временной зависимости сигнала, являющегося результатом рассеяния оптических импульсов, вводимых в волокно. При этом пространственное разрешение рефлектометра, обычно измеряемое в метрах, зависит, в первую очередь, от длительности этих импульсов. Использование когерентного излучения для формирования импульса позволяет помимо интенсивности анализировать фазу пришедшего сигнала, что многократно повышает чувствительность сенсорной системы к внешнему воздействию.

Одним из видов фазочувствительного OTDR является оптический рефлектометр с чирпированным импульсом [15], то есть импульсы с переменной оптической частотой. Данный тип рефлектометра имеет несколько преимуществ по сравнению с традиционными рефлектометрами, работающими на одной длине волны. К ним относятся улучшенное разрешение, сокращение размеров так называемых «мертвых зон», возможность внутриимпульсного «сверхразрешения» по длине волокна и повышенное отношение сигнал/шум [16]. К тому же, такие рефлектометры относятся к устройствам прямого детектирования, что делает их более простыми в техническом плане, поскольку способны проводить фазовые измерения с использованием всего одного фотоприемника. Следует, однако, отметить, что анализ, данных с таких рефлектометров является непростой задачей, которая может быть решена с использованием современных методов машинного обучения.

2. Экспериментальная установка.

Поскольку эффективность и точность работы нейронных сетей напрямую зависят от объема, разнообразия и точности данных, используемых в процессе их обучения, то основной задачей, является сбор высококачественных данных.

В качестве исходных данных для обучения нейросетей используются сведения, получаемые с помощью чирп-рефлектометров, оснащенных лазерами с возможностью изменения длины волны. Эта установка позволяет имитировать

различные внешние воздействия на оптическое волокно путем изменения рабочей длины волны, обеспечивая таким образом сбор данных с различных участков волокна.

В процессе формирования рефлектометрического сигнала в когерентном рефлектометре каждая пара отражателей в световом импульсе создает интерференцию, и суммарный эффект от M таких отражателей можно описать формулой 1:

$$I(t) \sim I_0 \sum_{m=1}^M r_m^2 + 2I_0 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M r_i r_j \cos(\phi_i - \phi_j), \quad (1)$$

где $I(t)$ значение интенсивности для рефлектограммы, I_0 – интенсивность падающего излучения r_i – коэффициент отражения i -го рассеивателя, M – число отражателей, попадающих в световой импульс, $(\phi_i - \phi_j)$ – разность фаз световых волн для i и j отражателей. В свою очередь разность фаз выражается, как

$$\phi_i - \phi_j = 4\pi n \left(\frac{L_{ij}}{\lambda} \right), \quad (2)$$

где n – показатель преломления, L_{ij} – расстояние между i и j отражателями, λ – длина волны.

Таким образом интерференционный сигнал в оптическом волокне зависит от разности фаз между интерферирующими волнами, определяемой соотношением L/λ , где L – расстояние между отражателями, а λ – длина волны излучения. Следовательно, изменяя длину волны, можно имитировать изменения расстояния между отражателями и наоборот.

Оптическая схема рефлектометра с перестройкой длины волны приведена на рисунке 1.

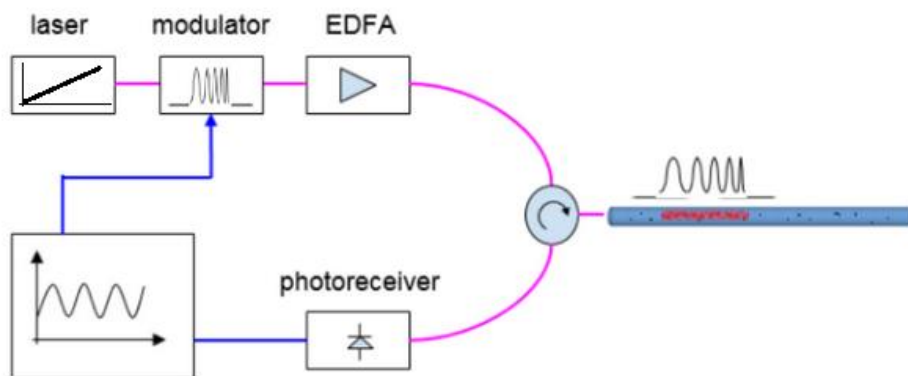


Рис. 1. Оптическая схема сканирующего рефлектометра.

В основе установки лежит рефлектометр OTDR, оснащенный лазером, способным изменять длину волны своего излучения, при этом изменение центральной длины волны происходит от импульса к импульсу по заданному оператором закону. Это позволяет моделировать различные внешние воздействия на оптическое волокно, такие как деформация или изменения температуры. В данном эксперименте в качестве измерительного устройства использовался объединенный прибор – сканирующий чирп-рефлектометр, хотя может быть использован любой другой тип OTDR-рефлектометра, способный восстанавливать фазовый сигнал.

Сканирование длины волны лазера проводилось по пилообразному закону функции с частотным диапазоном от 0.1 до 10 Гц. Эта частота значительно ниже частоты следования зондирующих импульсов в килогерцевом диапазоне, что обеспечивает соответствие каждой рефлектограммы определенной длине волны лазера. Центральная длина волны лазера составляла 1550 нм с диапазоном сканирования 3 нм, частота оцифровки рефлектограмм – 100 МГц, а длительность импульсов – 70 нс.

В процессе измерения фазы с использованием чирп-рефлектометра, применяемого в качестве когерентного OTDR, ключевым моментом является учет того, что воздействие на волокно или изменение его длины волны приводят к сдвигу соответствующего участка на рефлектограмме (см. рисунок 2).

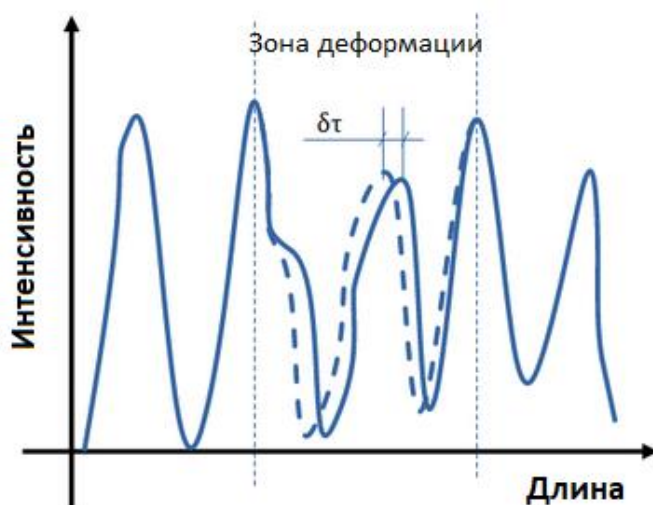


Рис. 2. Изменение рефлектограммы, полученной чирп-рефлектометром при воздействии на волокно.

Значение сдвига рефлектограммы δt , в соответствующей зоне воздействия деформации, позволяет определить знак и величину воздействия на волокно.

3. Обработка данных.

3.1. Алгоритм взаимной корреляции (СС).

В обработке сигналов часто применяется алгоритм кросс-корреляции для определения сдвига интерференционных полос между двумя последовательными рефлектограммами I_1 и I_2 . Этот алгоритм включает расчет корреляционной связи между соответствующими сегментами этих рефлектограмм, взятыми из одного и того же места в разные моменты времени с использованием корреляционного окна τ_{corr} , обычно равного продолжительности импульса [17]:

$$K(t) = \left(correlation \left[I_1 \left(t - \frac{\tau_{corr}}{2}, t + \frac{\tau_{corr}}{2} \right), I_2 \left(t - \frac{\tau_{corr}}{2}, t + \frac{\tau_{corr}}{2} \right) \right] \right), \quad (3)$$

при этом смещение пика корреляции между двумя последовательными рефлектограммами позволяет определить величину и направление воздействия на волокно.

Несмотря на свою простоту, этот метод имеет недостатки, включая наличие артефактов в данных, которые требуют фильтрации. В типичных случаях около 10% измерений фазы оказываются выбросами и нуждаются в коррекции [18].

Этот метод устанавливает базовый уровень качества сигнала, с которым сравнивались результаты, полученные при помощи алгоритмов, основанных на нейронных сетях.

3.2. Алгоритм на основе нейронных сетей (NN).

Описанный выше сканирующий рефлектометр также обеспечивает возможность сбора данных для обучения алгоритма на основе нейронных сетей. Благодаря известной величине воздействия, выраженной через изменение длины волны между двумя последовательными рефлектограммами, можно

использовать эти рефлектограммы в качестве входных данных для нейросети. Выходом же в этом случае будет информация об изменении длины волны.

После нескольких итераций и улучшений была предложена следующая схема нейросети:

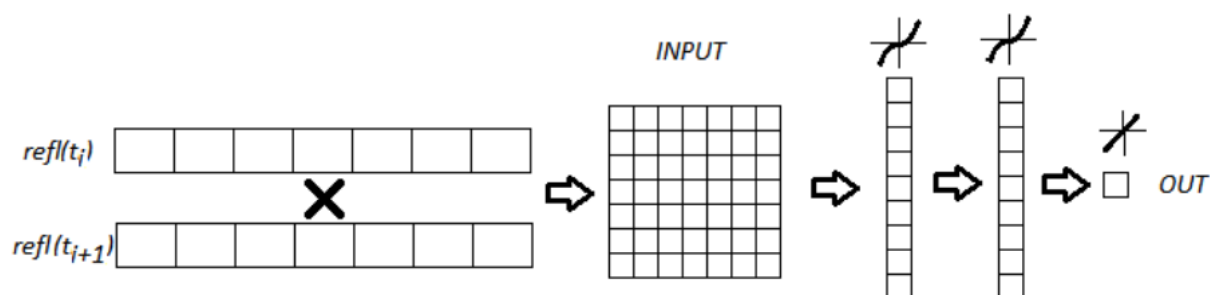


Рис. 3. Конфигурация нейронной сети для восстановления фазы в чирп-рефлектометре.

В алгоритме, основанном на нейронной сети, на вход подавалась 7×7 матрица, содержащая произведения значений из двух сегментов по 7 элементов каждый из последовательных рефлектограмм $\text{refl}(t_i)$ и $\text{refl}(t_{i+1})$. Далее эти данные обрабатывались двумя плотными слоями (dense layers), каждый из которых содержал 9 нейронов. В каждом из этих слоев использовалась сигмоидная функция активации, тогда как выходной нейрон функционировал с линейной активацией [19]. Входная последовательность из семи элементов рефлектограмм соответствовала корреляционному окну алгоритма кросс-корреляции и представляла собой сегмент длиной в 7 метров светового импульса в волокне. Вместо прямого использования значений рефлектограмм, на вход подавались их произведения, аналогично методике кросс-корреляции, хотя также рассматривается возможность применения других методов предварительной обработки сигнала.

В процессе обучения нейросети в качестве входных данных использовались пары рефлектограмм и соответствующие значения смещения длины волны. Данные для обучения были собраны из различных участков волокна, чтобы избежать переобучения, ограниченного конкретным сегментом и таким образом было набрано 4000 участков рефлектограмм.

4. Результаты. Обсуждение.

4.1. Оценка восстановления фазы.

Используя алгоритмы кросс-корреляции и нейронные сети на основе двух рефлектограмм, было вычислено изменение длины волны излучения и затем сопоставлено с фактическим. Результаты, полученные с помощью этих алгоритмов, демонстрируют отклик системы изменение длины волны излучения, что показано на рисунке 4, где по оси абсцисс истинное значение изменения длины волны, подаваемое на рефлектометр, а по оси ординат – вычисляемый отклик.

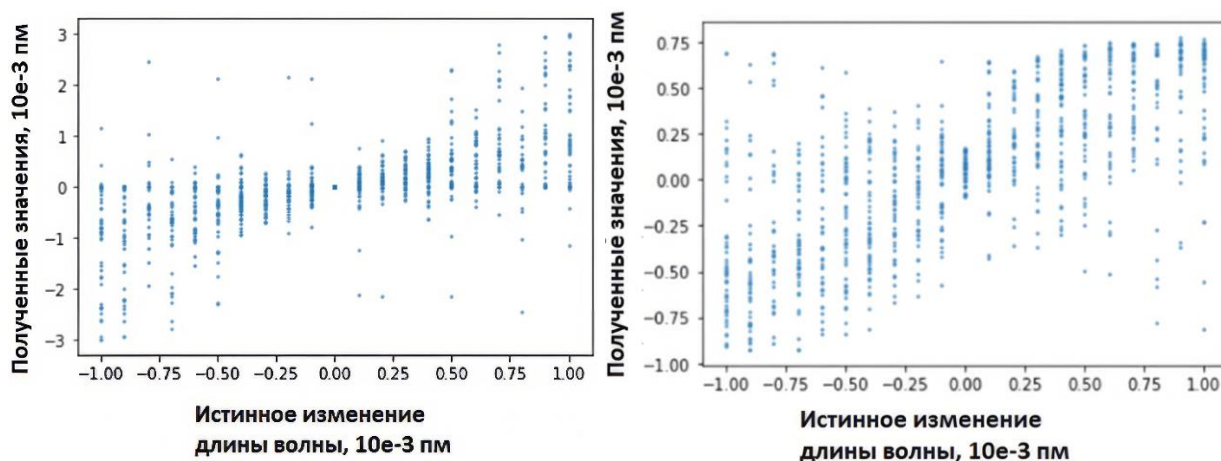


Рис. 4. Распределение вычисленных и фактических значений сигнала, полученные для алгоритмов: кросс-корреляции (слева) и нейроалгоритма (справа).

Из анализа диаграммы истинно-вычисленных видно, что алгоритм, основанный на нейронных сетях, обеспечивает более точное приближение к истинному значению сигнала по сравнению с алгоритмом кросс-корреляции, для которого наблюдается больший разброс значений.

4.2. Оценка равномерности отклика вдоль волокна.

Сравнение алгоритмов на базе нейроанализа с кросс-корреляционным показывает, что нейросетевые методы более эффективны. Это подтверждается количественными данными, где среднеквадратичное отклонение (СКО) для нейроалгоритма составляет 0,26 fm против 0,39 fm для кросс-корреляционного

алгоритма при изменении длины волны на 1 fm. Еще более высокая точность достигается при использовании нейроалгоритма с входными данными на основе трех последовательных рефлектограмм, где СКО уменьшается до 0,22 fm.

Эти результаты подчеркивают преимущества применения методов искусственного интеллекта, в частности нейросетевых алгоритмов, в сложных задачах анализа волоконно-оптических систем. Они не только обеспечивают более высокую точность, но и могут адаптироваться к различным условиям измерений, учитывая неравномерность откликов в волокне.

Заключение.

В рамках данного исследования был разработан новый алгоритм демодуляции фазы для фазочувствительного рефлектометра, основанный на принципах машинного обучения. Для обучения алгоритма использовались данные, собранные при помощи сканирующего рефлектометра. Проведенное сравнение данного подхода с традиционным методом демодуляции фазы в chirp-рефлектометрах, основанным на кросс-корреляции, выявило значительное преимущество и перспективность нового метода.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН.

Литература

1. Juškaitis R., Mamedov A. M., Potapov V. T., Shatalin S. V. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber // Optics Letters. 1994 – Vol. 19, № 3. – P. 225. – DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.19.000225>.
2. Liu S., Yu F., Hong R., Xu W., Shao L., Wang F. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry // Opto-Electronic Advances. 2022. – Vol. 5, № 3. – P. 200078–200078. – DOI: <https://doi.org/10.29026/oea.2022.200078>.

3. Pnev A. B., Zhirnov A. A., Stepanov K. V., Nesterov E. T., Shelestov D. A., Karasik V. E. Mathematical analysis of marine pipeline leakage monitoring system based on coherent OTDR with improved sensor length and sampling frequency // Journal of Physics: Conference Series. 2015. – № 584. – P. 012016. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/584/1/012016>.
4. Lindsey N. J. Geophysical Applications of ϕ -OTDR/DAS // Optical Fiber Communication Conference (OFC). 2023. – URL: <http://dx.doi.org/10.1364/ofc.2023.w1j.1>.
5. He M., Feng L., Fan J. A method for real-time monitoring of running trains using Φ -OTDR and the improved Canny // Optik. 2019. – Vol. 184. – P. 356–363. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.04.112>.
6. Cai Y., Ma J., Yan W., Zhang W., An Y. Aircraft detection using phase-sensitive optical-fiber OTDR // Sensors. 2021. – Vol. 21, № 15. – P. 5094. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s21155094>.
7. Yang N., Zhao Y., Chen J., Wang F. Real-time classification for Φ -OTDR vibration events in the case of small sample size datasets // Optical Fiber Technology. 2023. – Vol. 76. – P. 103217. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103217>.
8. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. – DOI: <http://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
9. Chubchev E. D., Tomyshev K., Nechepurenko I., Dorofeenko A., Butov O. V. Machine learning approach to data processing of TFBG-assisted SPR sensors // Journal of Lightwave Technology. 2022. – Vol. 40, № 9. – P. 3046–3054. – DOI: <https://doi.org/10.1109/jlt.2022.3148533>.
10. Shi Y., Wang Y., Zhao L., Fan Z. An event recognition method for Φ -OTDR sensing system based on deep learning // Sensors. 2019. – Vol. 19, № 15. – P. 3421. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s19153421>.

11. Peng F., Wu H., Jia X.-H., Rao Y.-J., Wang Z.-N., Peng Z.-P. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines // Optics Express. 2014. – Vol. 22, № 11. – P. 13804. – DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.22.013804>.
12. Chen D., Liu Q., He Z. Distributed fiber-optic acoustic sensor with sub-nano strain resolution based on time-gated digital OFDR // Asia Communications and Photonics Conference. 2017. – DOI: <https://doi.org/10.1364/ACPC.2017.S4A.2>.
13. Yatseev V. A., Zotov A. M., Butov O. V. Combined frequency and phase domain time-gated reflectometry based on a fiber with reflection points for absolute measurements // Results in Physics. 2020. – Vol. 19. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103485>.
14. Zinsou R., Liu X., Wang Y., Zhang J., Wang Y., Jin B. Recent progress in the performance enhancement of phase-sensitive OTDR vibration sensing systems // Sensors. 2019. – Vol. 19, № 7. – P. 1709. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s19071709>.
15. Fernández-Ruiz M. R., Costa L., Martins H. F. Distributed acoustic sensing using chirped-pulse phase-sensitive OTDR technology // Sensors. 2019. – Vol. 19, № 20. – P. 4368. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s19204368>.
16. He H., Yan L., Qian H., Zhou Y., Zhang X., Luo B., Pan W., Fan X., He Z. Suppression of the interference fading in phase-sensitive OTDR with phase-shift transform // Journal of Lightwave Technology. 2021. – Vol. 39, № 1. – P. 295–302. – DOI: <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.3023699>.
17. Wang D., Zou J., Wang Y., Jin B., Bai Q., Liu X., Liu Y. Distributed optical fiber low-frequency vibration detecting using cross-correlation spectrum analysis // Journal of Lightwave Technology. 2020. – Vol. 38, № 23. – P. 6664–6670. – DOI: <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.3016117>.

18. Bhatta H. D., Costa L., Garcia-Ruiz A., Fernandez-Ruiz M. R., Martins H. F., Tur M., Gonzalez-Herraez M. Extending the measurement of true dynamic strain via chirped-pulse phase-sensitive optical time domain reflectometry to 100's of microstrains // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors. 2018. – URL: <http://doi.org/10.1364/ofs.2018.wf14>.
19. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series) // The MIT Press 2016.

Для цитирования:

Яцеев В.А., Бутов О.В. Применение машинного обучения для детектирования фазы в когерентном оптическом рефлектометре. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.16>