



**OPTICAL REFLECTOMETRY,
METROLOGY & SENSING 2020
International Conference
Abstracts Book**

**ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ,
МЕТРОЛОГИЯ И СЕНСОРИКА
2020
Сборник тезисов
международной конференции**

Пермь 2020 | Perm 2020

Международная конференция «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика – 2020», 23-24 сентября 2020 г., г. Пермь. Сборник тезисов докладов. – Пермь: 2020. -85 с.

В сборник включены тезисы докладов, представленные на Международной конференции «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика – 2020», прошедшей 23-24 сентября 2020 г., в г. Пермь. (Россия).

Доклады сделаны учеными, инженерами, разработчиками – представителями академической и вузовской науки, научно-исследовательских институтов, а также сотрудниками других организаций. Конференция организована Лабораторией фотоники и Лабораторией агриобиофотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН при содействии организаций-партнеров.

Редакционная коллегия: Р.И. Петрова, К.А. Трефилова, И.А. Лобач, Б.Г. Горшков, А.А. Фотиади, М.Е. Белокрылов, Ю.А. Константинов

Научное издание. Печатается в авторской редакции.

The book includes abstracts, presented at the International Conference "Optical reflectometry, metrology and sensorics - 2020", held on September 23-24, 2020, in Perm. (Russia).

The reports were made by scientists, engineers, developers - representatives of academic and university science, research institutes, as well as employees of other organizations. The conference was organized by the Photonics Laboratory and the Agri-biophotonics Laboratory of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences with the assistance of partner organizations.

Editorial board: R.I. Petrova, K.A. Trefilova, I.A. Lobach, B.G. Gorshkov, A.A. Fotiadi, M.E. Belokrylov, Yu.A. Konstantinov

Scientific publication. Reprinted in the author's edition.

CONFERENCE CHAIR

Co-Chairs of the Conference:

Gorshkov Boris Georgievich, Doctor of Engineering, Senior Researcher (A.M. Prokhorov Institute of General Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow)

Burdin Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Engineering, Professor, Department Chair (PSUTI, Samara)

Program Committee:

Burdin Anton Vladimirovich, Doctor of Engineering, Professor (PSUTI, Samara) - **Chairman**

Lobach Ivan Aleksandrovich, PhD, Senior Researcher (IAE SB RAS, Novosibirsk) - **Deputy Chairman**

Zinan Wang, PhD, Professor (Full) (University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China)

Belovolov Mikhail Ivanovich, PhD, Senior Researcher (FORC RAS, Moscow)

Shelemba Ivan Sergeyeovich, PhD, Chief Designer, 1st Vice-director (Inversion Sensor, LLC, Perm)

Gorshkov Boris Georgievich, Doctor of Engineering, Senior Researcher (GPI named after A.M. Prokhorov RAS, Moscow)

Shardakov Igor Nikolaevich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Laboratory for Intelligent Monitoring (ICMM UB RAS - branch of the PFRC UB RAS, Perm)

Fotiadi Andrei Alexandrovich, PhD, Professor (Université de Mons, Belgium)

Ponomarev Roman Sergeevich, PhD, Senior Researcher Photonics Laboratory (PFRC UB RAS, Perm), associate professor (PSNRU, Perm)

Kryukov Igor Ivanovich, PhD, Scientific-educational Center Assistant Director (PNPPK, Perm)

Svintsov Anatoly Gennadevich, PhD, Editor-in-Chief (Photon Express Journal, Moscow)

Dashkov Mikhail Viktorovich, PhD, Associate Professor (PSUTI, Samara)

Akopov Sergey Georgievich, PhD, Technical Director (Corning CIS LLC, Moscow)

Barkov Fedor Leonidovich, PhD, Senior Researcher Photonics Laboratory (PFRC UB RAS, Perm)

Burdin Vladislav Viktorovich, PhD, Associate Professor (PNRPU, Perm), Senior Researcher Laboratory of Photonics (PFRC UB RAS, Perm)

Maksimov Alexander Yuryevich, PhD, Senior Researcher Laboratory of Molecular Microbiology and Biotechnology (IEGM UB RAS - branch of the PFRC UB RAS, Perm), Associate Professor, Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Biology (PSNRU, Perm).

Scientific Secretary:

Konstantinov Yuri Alexandrovich, PhD, Head of Photonics Laboratory (PFRC UB RAS, Perm)

Organizing committee:

Baryakh Aleksander Abramovich, Doctor of Engineering, Professor (Director PFRC UB RAS, Perm), Head of Laboratory (MI UB RAS - branch of the PFRC UB RAS, Perm)

Matveenkov Valery Pavlovich, Doctor of Engineering, Professor, Academician of RAS Director (ICMM UB RAS - branch of the PFRC UB RAS, Perm)

Shelemba Ivan Sergeyeovich, PhD, Chief Designer, 1st Vice-director (Inversion Sensor, LLC, Perm)

Konstantinov Yuri Alexandrovich, PhD, Head of Photonics Laboratory (PFRC UB RAS, Perm)

Burdin Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Engineering, Professor, Department Chair (PSUTI, Samara)

Votinova Anastasia Grigorievna, PhD, Associate General Scientific Secretary (PFRC UB RAS, Perm)

Conference Coordinator:

Petrova Regina Igorevna, Scientific-Organizing Department Head (PFRC UB RAS, Perm)

Программный комитет:

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., профессор (ПГУТИ, Самара) – **председатель**

Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник (ИАЭ СО РАН, Новосибирск) - **заместитель председателя**

Зинан Ван, доктор наук, профессор (Университет электроники и технологий Китая, Чэнду, Китай)

Беловолов Михаил Иванович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник (НЦВО РАН, Москва)
Шелемба Иван Сергеевич, к.т.н., главный конструктор, первый заместитель генерального директора («Инверсия-Сенсор», Пермь)
Горшков Борис Георгиевич, д.т.н., старший научный сотрудник (ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва)
Шардаков Игорь Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга (ИМСС УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь)
Фотиади Андрей Александрович, к.ф.-м.н., профессор (Университет г. Монс, Бельгия)
Пономарев Роман Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории фотоники (ПФИЦ УрО РАН, Пермь), доцент (ПГНИУ, Пермь)
Крюков Игорь Иванович, к.т.н., помощник директора Научно-образовательного центра (ПНППК, Пермь)
Свинцов Анатолий Геннадьевич, к.т.н., главный редактор журнала «Фотон Экспресс», (Москва)
Дашков Михаил Викторович, к.т.н., доцент (ПГУТИ, Самара)
Акопов Сергей Георгиевич, к.ф.-м.н., технический директор (ООО «Корнинг СНГ», Москва)
Барков Федор Леонидович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории фотоники (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)
Бурдин Владислав Викторович, к.ф.-м.н., доцент (ПНИПУ, Пермь), старший научный сотрудник лаборатории фотоники (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)
Максимов Александр Юрьевич, к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории молекулярной микробиологии и биотехнологии (ИЭГМ УрО РАН - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь), доцент кафедры микробиологии и иммунологии биологического факультета (ПГНИУ, Пермь).

Ученый секретарь:

Константинов Юрий Александрович, к.т.н., заведующий лабораторией фотоники (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

Организационный комитет:

Барях Александр Абрамович, д.т.н., профессор, академик РАН (директор ПФИЦ УрО РАН, Пермь), зав. лабораторией (ГИ УрО РАН - филиал ПФИЦ УрО РАН)
Матвеев Валерий Павлович, д.т.н., профессор, академик РАН (научный руководитель ПФИЦ УрО РАН, Пермь), директор (ИМСС УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН)
Шелемба Иван Сергеевич, к.т.н., главный конструктор, первый заместитель генерального директора («Инверсия-Сенсор», Пермь)
Константинов Юрий Александрович, к.т.н. (заведующий лабораторией фотоники ПФИЦ УрО РАН, Пермь)
Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой (ПГУТИ, Самара)
Вотина Анастасия Григорьевна, к.ф.-м.н., зам. главного ученого секретаря (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

Координатор конференции:

Петрова Регина Игоревна, начальник научно-организационного отдела (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

СОДЕРЖАНИЕ

Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г., Морозов Г.А., Нуреев И.И., Лустина А.А., Анучин В.О., Курбиев И.У., Проскуряков А.Д., Кадушкин В.В., Алюшина С.Г. Предварительная рефлектометрическая настройка транспортной WDM-PON магистральной домена радиодоступа мобильных сетей 5G.....	11
Феофилактов С.В., Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г., Морозов Г.А., Нуреев И.И., Куликов Е.В., Курбиев И.У., Проскуряков А.Д., Кадушкин В.В. Квази-распределенная акустическая сенсорная система для контроля движения среды в поллой трубе.....	13
Барков Ф. Л., Константинов Ю. А., Бурдин В. В., Кривошеев А. И. Оценка возможностей разделения температур и деформаций в данных, полученных методом Р-BOTDA.....	15
Таранов М.А., Горшков Б.Г., Алексеев А.Э. Достижение 85-километровой дальности измерений деформации (температуры) с помощью низкокогерентной рэлееской рефлектометрии.....	18
Таранов М.А., Горшков Б.Г., Жуков К.М., Гринштейн М.Л. О минимальной неопределённости измерения коэффициента затухания в одномодовом оптическом волокне, достижимой с использованием рэлееской рефлектометрии.....	20
Конин Ю.А., Булатов М.И., Щербакова В.А., Гаранин А.И., Токарева Я.Д., Мошева Е.В. Исследование свойств цельноволокнистого датчика температуры, созданного при помощи эффекта плавления.....	22
Горшков Б. Г. Методы восстановления сигналов фазового OTDR: схемы, их характеристика, источники погрешностей, примеры использования.....	24
Власов А.А., Плотников М.Ю., Алейник А.С., Лавров В.С., Аширов А.Н., Никитенко А.Н., Варламов А.В., Кикилич Н.Е., Киселев С.С. Повышение точностных характеристик волоконно-оптической гидроакустической буксируемой косы для морских геофизических исследований и сейсмической разведки.....	25
Алексеев А.Э., Горшков Б.Г., Потапов В.Т., Таранов М.А., Симикин Д.Е. Точность отклика фазового рефлектометра.....	27
Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., Латкин К.П., Клод Д., Селезнев Д.А., Степин А.А., Конин Ю.А., Щербакова В.А., Кашина Р.Р. Рефлектометрический метод измерения длины активных волоконных световодов.....	29
Фадеев К. М., Ларионов Д. Д., Жикина Л. А., Минкин А. М., Шевцов Д. И. Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра Фабри-Перо и волоконной брэгговской решетки.....	31

Ткаченко А. Ю., Смолянинов Н. Н., Скворцов М. И., Лобач И. А., Каблуков С. И. Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты для сенсорных применений.....	33
Кузнецов П.И., Судас Д.П., Савельев Е. А. Формирование волоконных тейперов методом химического травления для применения в волоконных датчиках и лазерах.....	35
Горлов Н.И., Богачков И.В. Основы информационной безопасности физических каналов оптических сетей доступа.....	37
Бочкова С.Д., Волковский С.А., Ефимов М.Е, Дейнека И.Г., Смирнов Д.С., Литвинов Е.В. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии.....	39
Горшков Б. Г., Горшков Г. Б., Жуков К. М. Рефлектометр для измерения потерь в оптических волокнах малой длины на основе регистрации излучения низкочастотного комбинационного рассеяния света.....	41
Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М. Рефлектометрическое измерение криогенных температур методом регистрации бозонных компонент рамановского рассеяния света в оптическом волокне.....	43
Богачков И. В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования влияния изгибов оптических волокон различных видов на бриллюэновские рефлектограммы.....	45
Богачков И. В., Горлов Н. И. Выявление фактора воздействия на оптические волокна по бриллюэновским мульти-рефлектограммам.....	47
Богачков И. В., Горлов Н. И. Формирование базы данных характеристик рассеяния мандельштама – бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов.....	50
Богачков И. В., Горлов Н.И. Автоматизированная обработка данных бриллюэновских рефлектограмм для определения разновидностей и характеристик состояния одномодовых оптических волокон.....	52
Фролов И.В. Оценка точности рефлектометрических измерений коэффициента затухания оптических волокон.....	55
Бобров В.И., Гринштейн М.Л., Зюзин М.С. Некоторые особенности мониторинга ВОЛС по рабочим оптическим волокнам.....	58

Алексеев А.Э., Горшков Б.Г., Потапов В.Т., Симикин Д.Е., Таранов М.А. Отклик фазового рефлектометра на однородное воздействие.....	60
Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Донченко С.С., Прохоров Д.В., Дейкун А.В., Чемесова Е.В. Методы и средства калибровки оптических рефлектометров с пикосекундным разрешением.....	62
Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дельмухаметов О.Р., Евтушенко А.С., Желудков М.А., Зайцева Е.С. Простой способ локализации событий на рефлектограммах группы оптических волокон одного элементарного кабельного участка волоконно-оптической линии передачи.....	64
Григорьев В.В., Митюрёв А.К., Науменко Е.А., Погоньшев А.О., Подюкова Л.В., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. Совершенствование средств метрологического обеспечения OTDR рефлектометров.....	66
Григорьев В.В., Митюрёв А.К., Науменко Е.А., Погоньшев А.О., Подюкова Л.В., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. Аспекты метрологического обеспечения современных оптических рефлектометров.....	68
Яцеев В.А., Бутов О.В. Методы нормализации отклика фазочувствительного chirp-рефлектометра....	71
Бурдин В.А., Бурдин А.В., Зайцева Е.С. Алгоритмы обработки поляризационных характеристик обратного рассеяния на основе разложения Прони.....	73
Бенгальский Д.М., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Никитин С.П., Наний О.Е., Трешиков В.Н. Работа когерентного рефлектометра в условиях сильного локального воздействия на волокно.....	75
Казаков И.А., Конторов С.М., Шипулин А.В., Кюпперс Ф. Разработка интегрально-фотонного интеррогатора на основе дифракционной волноводной решетки.....	77
Zhang W.T., Huang W.Z., Wang Y.B., Zhang J.X., Lv B., Yao Y., Li F. Field test of broadband fiber optic interferometric seismometer with modulation depth feedback control.....	79
Huang W.Z., Zhang W.T., Li F. Research on temperature compensation of ultra-high-resolution fbg static strain sensor in crustal deformation observation.....	81
Трегубов А.В., Приходько В.В., Алексеев А.С., Жуков А.В. Разработка и исследование модели распределённого калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама- Бриллюэна.....	83

CONTENTS

Sakhabutdinov A.Zh., Morozov O.G., Morozov G.A., Nureev I.I., Lustina A.A., Anuchin V.O., Kurbiev I.U., Proskuryakov A.D., Kadushkin V.V., Alyushina S.G. Preliminary reflectometric configuration of the WDM-PON transport domain of the 5G mobile network radio access.....	11
Feofilaktov S.V., Sakhabutdinov A.Zh., Morozov O.G., Morozov G.A., Nureev I.I., Kulikov E.V., Kurbiev I.U., Proskuryakov A.D., Kadushkin V.V. Quasi-distributed acoustic sensor system for the media movement monitoring in the hollow tube.....	13
Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Burdin V.V. Krivosheev A.I. Evaluation of temperatures and strains discrimination possibilities in data obtained by the P-BOTDA method.....	15
Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E. Achievement of an 85 km distance range of strain (temperature) measurements using low-coherence Rayleigh reflectometry.....	18
Taranov M.A., Gorshkov B.G., Zhukov K.M., Grinshtein M.L. On the minimum uncertainty of attenuation coefficient measurement in a single-mode optical fiber, achievable using Rayleigh reflectometry.....	20
Konin Yu.A., Bulatov M.I., Shcherbakova V.A., Garanin A.I. Tokareva Ya.D., Mosheva E.V. Investigation of the properties of an all-fiber temperature sensor created using the melting effect.....	22
Gorshkov B. G. Phase OTDR: signal recovery methods, comparative characteristics, sources of errors, applications.....	24
Vlasov A.A., Plotnikov M.Yu., Aleinik A.S., Lavrov V.S., Ashirov A.N., Nikitenko A.N., Varlamov A.V., Kikilich N.E., Kiselev S.S. Improving the accuracy characteristics of a fiber-optic sonar towed streamer for marine geophysical exploration and seismic exploration.....	25
Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A., Simikin D.E. Phase reflectometer response accuracy.....	27
Belokrylov M.E., Konstantinov Yu.A., Claude D., Seleznev D.A., Stepin A.A., Konin Yu.A., Shcherbakova V.A., Kashina R.R., Latkin K.P. Reflectometry method for measuring the length of active optical fibers.....	29
Fadeev K. M., Larionov D. D., Zhikina L. A., Minkin A. M., Shevtsov D. I. Fiber optical sensor for simultaneous temperature and pressure measurement using a Fabry-Perot interferometer and a fiber Bragg grating.....	31
Tkachenko A. Yu., Smolyaninov N.N., Skvortsov M.I., Lobach I.A., Kablukov S.I. Coherent optical frequency domain reflectometer based on a fiber laser with self-sweeping frequency for sensory applications.....	33

Kuznetsov P.I., Sudas D.P., Saveliev E.A. Creation of fiber tapers by chemical etching for application in fiber sensors and lasers.....	35
Gorlov N.I., Bogachkov I.V. Bases of information security of physical channels of optical access networks.....	37
Bochkova S.D. , Volkovsky S.A., Efimov M.E., Deineka I.G. , Smirnov D.S., Litvinov E.V. The method of finding the area of an impact in composite material using fiber optical sensors of acoustic emission.....	39
Gorshkov B. G., Gorshkov G. B., Zhukov K. M. Reflectometer for measuring losses in small-length optical fibers based on registration of low-frequency Raman scattering.....	41
Gorshkov B. G., Gorshkov G. B., Zhukov K. M. Reflectometric measurement of cryogenic temperatures by the method of bosonic components of the Raman scattering registration in an optical fiber.....	43
Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Experimental studies of the different kinds of optical fibers bending influence on Brillouin reflectograms.....	45
Bogachkov I.V., Gorlov N.I. An identification of influence on optical fibers factor by Brillouin multi-reflectograms.....	47
Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Creation of the database for the Brillouin scattering characteristics in different kinds of single-mode optical fibers.....	50
Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Automated data processing of Brillouin reflectograms for determining varieties and characteristics of the single-mode optical fibers state.....	52
Frolov I.V. Evaluation of the reflectometric attenuation measurements accuracy of the optical fibers.....	55
Bobrov V.I., Greenstein M.L., Zyuzin M.S. Certain aspects of in-service OTDR monitoring of optical fiber lines.....	58
Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E., Taranov M.A. Phase-OTDR response to uniform external perturbation.....	60
Kolmogorov O.V., Schipunov A.N., Donchenko S.S., Prokhorov D.V., Deikun A.V., Chemesova E.V. Methods and instruments of optical reflectometers calibration with picosecond resolution.....	62

Burdin A.V., Burdin V.A., Delmukhametov O.R., Evtushenko A.S., Zheludkov M.A., Zaitseva E.S.	
A simple method of localizing events in a group of optical fibers reflectograms at one elementary cable part of a fiber-optical transmission line.....	64
Grigoryev V.V., Mityurev A.K., Naumenko E.A., Pogonyshev A.O., Podyukova L.V., Savkin K.B., Tikhomirov S.V.	
Improvement of metrological methods for OTDRs.....	66
Grigoryev V.V., Mityurev A.K., Naumenko E.A., Pogonyshev A.O., Podyukova L.V., Savkin K.B., Tikhomirov S.V.	
Some aspects of modern optical reflectometers metrological support.....	68
Yatseev V.A., Butov O.V.	
Methods of normalizing the response of a phase-sensitive chirp-reflectometer.....	71
Burdin V.A., Burdin A.V., Zaitseva E.S.	
Algorithms for processing of backscattering polarization characteristics based on Prony decomposition.....	73
Bengalski D.M., Kharasov D.R., Fomiryakov E.A., Nikitin S.P., Nanyi O.E., Treshchikov V.N.	
The performance of a coherent reflectometer under conditions of strong local exposure to fiber.....	75
Kazakov I.A., Kontorov S.M., Shipulin A.V., Küppers F.	
Development of an integral-photon interrogator based on a diffraction waveguide grating.....	77
Zhang W.T., Huang W.Z., Wang Y.B., Zhang J.X., Lv B., Yao Y., Li F.	
Field test of broadband fiber optic interferometric seismometer with modulation depth feedback control.....	79
Huang W.Z., Zhang W.T., Li F.	
Research on temperature compensation of ultra-high-resolution FBG static strain sensor in crustal deformation observation.....	81
Tregubov A.V., Prikhodko V.V., Alekseev A.C., Zhukov A.V.	
Development and study of the model of a distributed calorimetric fiber dosimeter based on the effect of stimulated Brillouin scattering.....	83

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ТРАНСПОРТНОЙ WDM-PON МАГИСТРАЛИ ДОМЕНА РАДИОДОСТУПА МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ 5G

¹Сахабутдинов А.Ж., ¹Морозов О.Г., ¹Морозов Г.А., ¹Нуреев И.И., ¹Лустина А.А.,
¹Анучин В.О., ²Курбиев И.У., ²Проскуряков А.Д., ²Кадушкин В.В., ³Алюшина С.Г.

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань;

²ООО «НПК «Сенсорика», Сколково;

³МТУСИ, г. Москва

PRELIMINARY REFLECTOMETRIC CONFIGURATION OF THE WDM-PON TRANSPORT DOMAIN OF THE 5G MOBILE NETWORK RADIO ACCESS

Sakhabutdinov A.Zh., Morozov O.G., Morozov G.A., Nureev I.I., Lustina A.A., Anuchin V.O.,
Kurbiev I.U., Proskuryakov A.D., Kadushkin V.V., Alyushina S.G.

Аннотация

В докладе рассмотрены структурные решения для рефлектометрической процедуры настройки центральной длины волны лазеров сетевых узлов (ONU) пассивных оптических сетей с волновым мультиплексированием (WDM-PON), используемых в качестве транспортной магистрали в домене радиодоступа мобильных сетей 5G. В частности, приведена методика двухчастотного зондирования канала упорядоченной волноводной решетки (AWG) линейного терминала (OLT), позволяющая за одно измерение определить сигнал ошибки для настройки лазера ONU на центр канала AWG. Это позволит существенно упростить настройку канала при инициировании ONU и отменить необходимость применения вспомогательного канала управления и контроля (AMCC), вносящего искажения в информационный канал.

Управление длиной волны восходящих от ONU к OLT потоков очень важно в WDM-PON для обеспечения стабильной связи, тем более если они выступают как транспортные магистрали в доменах радиодоступа мобильных сетей 5G. В WDM-PON управление длиной волны необходимо в силу возможных ошибок установки длины волны при начальном соединении между OLT и ONU и дрейфа длины волны из-за старения лазерного диода передатчика ONU. Классические методы управления длиной волны решают эти проблемы, но требуют при этом наличия прецизионных внешних фильтров, например, эталонов Фабри-Перо, и множества фотодетекторов для контроля оптической мощности каждой длины волны восходящего потока [1-3]. Для упрощения контроля в структуру транспортного домена рекомендацией ITU-T G.989 введен AMCC, который, однако, требует значительного времени на настройку каналов и вносит искажения в структуру информации основного канала связи [3], поскольку формируется именно в нем различными видами низкочастотной модуляции. В частности, в [3] представлен многошаговый алгоритм настройки одного канала, который занимает по времени около 5 минут и состоит как минимум из 4 шагов для AWG с полосой пропускания 100 ГГц. Каждый шаг занимает около 1 минуты и определяется временем тепловой перестройки длины волны лазера. В данной работе нами предложена процедура предварительной рефлектометрической настройки длины волны лазера ONU, проводимая в начале процесса его инициирования, перед передачей управления AMCC.

Рассмотрим особенности взаимодействия двухчастотного зондирующего излучения с sinc-каналом AWG, который является основой волнового мультиплексора OLT. Для этого выполним дифференциальный анализ амплитуд составляющих, отраженных от решетки.

Обобщенную амплитудно-частотную характеристику sinc-канала AWG, на вход которого подается двухчастотное зондирующее излучение, можно определить с помощью следующего выражения:

$$S(\delta) = \sin \delta / \delta, \quad (1)$$

где δ - условная частота или расстройка. При настройке длины волны лазера ONU на центр канала AWG $\delta = \delta_0$.

АЧХ sinc-канала УВР и спектр выходного двухчастотного излучения представлены на рис. 1.

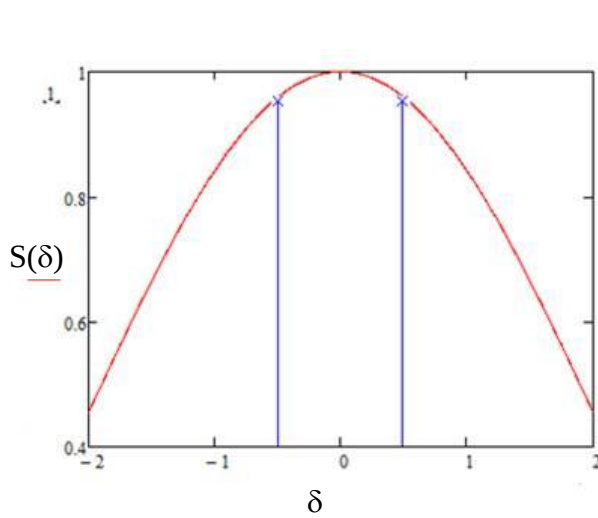


Рисунок 1. АЧХ sinc-канала и спектр выходного двухчастотного излучения при настройке в центр δ_0 .

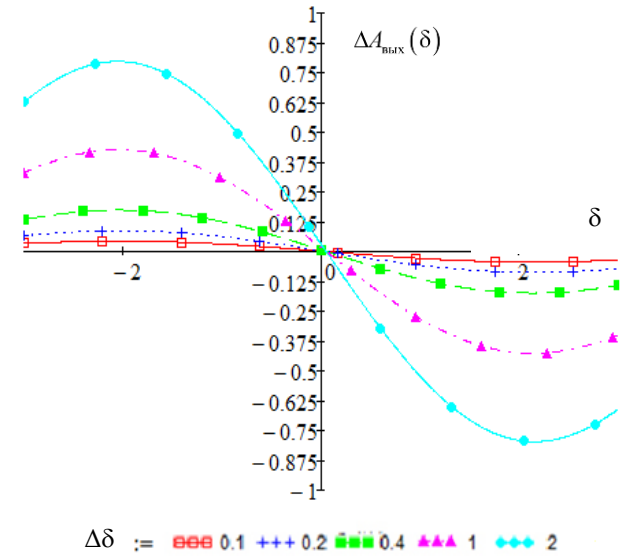


Рисунок 2. Зависимость $\Delta A_{\text{вых}}(\delta)$ для разных значений $\Delta\delta$ для sinc-канала.

Из рис. 1 видно, что значения амплитуд составляющих выходного двухчастотного излучения $A_{1\text{вых}}$, $A_{2\text{вых}}$, зависят от значений АЧХ канала на соответствующих значениях обобщенной расстройки составляющих входного двухчастотного излучения.

$$A_{1\text{вых}}(\delta_1) = \frac{\sin(\delta_1)}{\delta_1}, \quad A_{2\text{вых}}(\delta_2) = \frac{\sin(\delta_2)}{\delta_2}. \quad (2)$$

С учетом выражений для расстройки выражение (3.9) принимает вид:

$$A_{1\text{вых}} = \frac{\sin(\delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2})}{\delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2}}, \quad A_2 = \frac{\sin(\delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2})}{\delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2}}. \quad (3)$$

Следовательно, разность амплитуд первой и второй составляющих выходного двухчастотного излучения, $\Delta A_{\text{вых}}$, определяется выражением вида:

$$\Delta A_{\text{вых}} = \frac{\sin(\delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2})}{\delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2}} - \frac{\sin(\delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2})}{\delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2}}. \quad (4)$$

Рассмотрим зависимость разности амплитуд составляющих выходного двухчастотного излучения от значения средней обобщенной расстройки двухчастотного излучения при разных значениях расстройки между частотами $\Delta\delta$. Результаты расчетов зависимости $\Delta A_{\text{вых}}(\delta)$ для разных значений $\Delta\delta$ представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что по результатам одного измерения можно определить расстройку между длиной волны лазера ONU и центральной длиной волны канала AWG.

Крутизна кривых S зависит от значения $\Delta\delta$. При значении $\Delta\delta=2$, оценка разности амплитуд составляющих двухчастотного сигнала будет наиболее точной.

Литература

1. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Сахабутдинов А.Ж. и др. Радиофотонные двухчастотные способы интеррогации однотипных волоконных брэгговских решеток, объединенных в группу. - *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 20(2), 2017. - с.21-34.
2. Талипов А.А., Морозов О.Г., Ильин Г.И. и др. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа. - *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*, 2, 2012.- с. 3
3. Kazuaki Honda, Hirotaka Nakamura, Kazutaka Hara et al. Wavelength control method of upstream signals using AMCC in WDM-PON for 5G mobile fronthaul. - *Optics Express*, 27(19), 2019. - p.p. 26749-26756.

КВАЗИ-РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ В ПОЛОЙ ТРУБЕ

¹Феофилактов С.В., ²Сахабутдинов А.Ж., ²Морозов О.Г., ²Морозов Г.А., ²Нуреев И.И.,
³Куликов Е.В., ⁴Курбиев И.У., ⁴Проскуряков А.Д., ⁴Кадушкин В.В.

¹ООО «ИРЗ-ТЭК», г. Ижевск;

²Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань;

³ 3-й ЦНИИ МО РФ, г. Москва;

⁴ООО «НПК «Сенсорика», Сколково

QUASI-DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR SYSTEM FOR THE MEDIA MOVEMENT MONITORING IN THE HOLLOW TUBE

Feofilaktov S.V., Sakhabutdinov A.Zh., Morozov O.G., Morozov G.A., Nureev I.I.,
Kulikov E.V., Kurbiev I.U., Proskuryakov A.D., Kadushkin V.V.

Аннотация

В докладе рассмотрены структурные решения для комбинированных с бриллюэновскими или рамановскими акустическими сенсорными системами. В частности, приведена квази-распределенная акустическая сенсорная система, основанная на непрерывном широкополосном массиве двухэлементных волоконных брэгговских решеток.

Во введении рассмотрены различные виды интеррогации массива волоконно-оптических датчиков (ВОД) на однотипных волоконных брэгговских решетках (ВБР), применяемых для построения квази-распределенных сенсорных систем. Как прототип предложенного в работе решения выделена двухкомпонентная интеррогация однотипных ВБР, объединенных в группу, с использованием интерференции с частотным смещением. Обозначены недостатки, прототипа, в частности, сложность интерференционного устройства, его калибровки, управления двумя зеркалами с фарадеевским вращением, низкая скорость опроса и необходимость перестройки лазерного излучения по частоте. На основе сделанных сравнений впервые предложена модернизированная схема опроса массива ВОД, построенного на основе слабо отражающих двухэлементных волоконных брэгговских структурах (ДВБС) [1-3], для квази-распределенных акустических измерений. В работе представлена модель и приведены результаты численных экспериментов для анализа характеристик системы квази-распределенных акустических измерений на основе массива ДВБС (рис. 1).

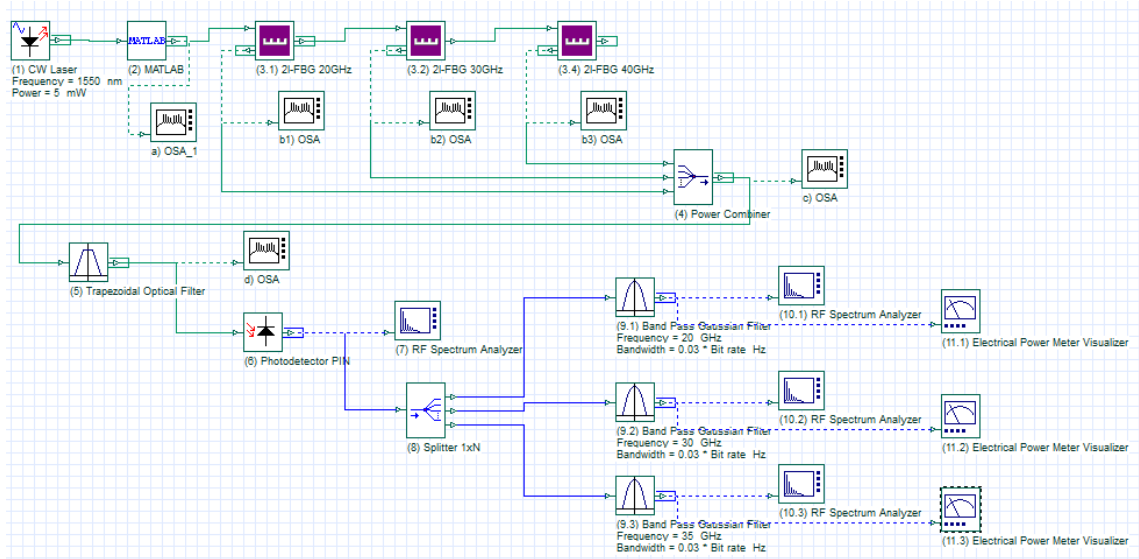


Рисунок 1. Модель опто-электронной схемы опроса ДВБС, основанная на анализе рефлектометрического сигнала.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики трех ДВБС, входящих в массив. Четвертая решетка является маркером окончания массива. Три первых ДВБС отличаются друг от друга адресной частотой – частотой разноса между двумя элементами каждой из решеток (20, 30, 40 ГГц).

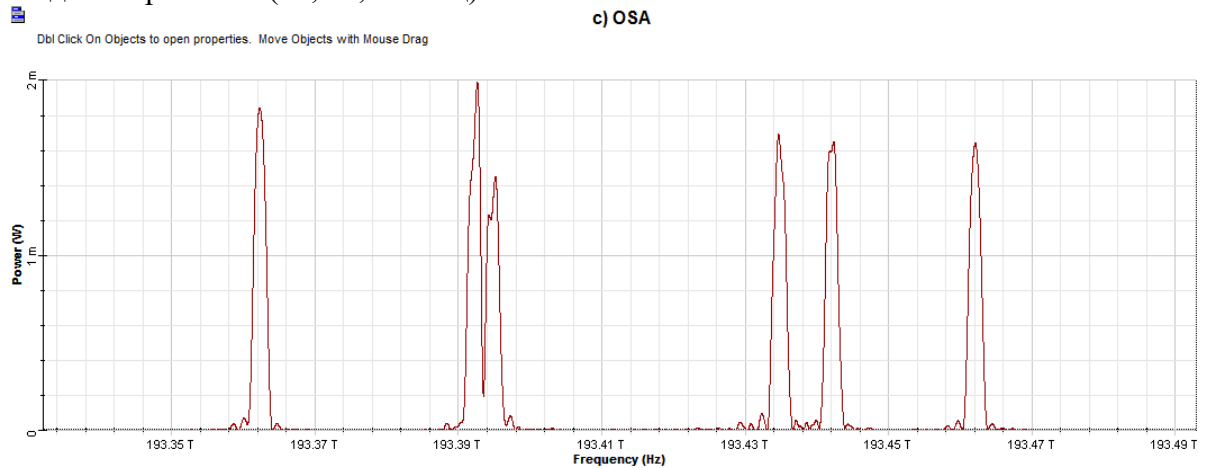


Рисунок 2. Спектральные характеристики ДВБС, входящих в массив.

Оценим влияние смещения центральной длины волны ДВБС₂ на результаты измерения. Для этого смоделируем смещение центральной длины волны ДВБС₂ в диапазоне от 1550.3 до 1550.8 нм с дискретным шагом 0.05 нм и оценим результаты измерения частоты и амплитуды опроса на ее адресной частоте для 11 последовательных различных положений ДВБС₂. Потребуем возникновения условия не одной кратности, а возникновения многократности разностных частот с другими решетками. Расположим ДВБС таким образом, чтобы в частотной области образовались несколько кратных частот, равных адресной частоте ДВБС₂. Результаты расчетов для данного случая с точностью задания начальных значений в 5% приведены ниже:

$$\omega = \begin{pmatrix} 52 \\ 70 \\ 90 \end{pmatrix}, z = \begin{pmatrix} 50.9377 \\ 68.5699 \\ 88.1614 \end{pmatrix}, s = \begin{pmatrix} 52.0061 \\ 70.0000 \\ 90.0000 \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} -6.0900 \cdot 10^{-3} \\ +2.5042 \cdot 10^{-7} \\ +3.3799 \cdot 10^{-7} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ω - положение центральных частот ДВБС₁₋₃ от условного начала координат, z , s – измеренные значения при крайних положениях ДВБС₂, ошибка измерения центральных частот в усл. ед. Максимальная погрешность определения положения ДВБС составляет не более 0.008 усл. ед. (8 МГц), что приводит к ошибке в определении центральной длины волны порядка сотых долей пика метра.

Таким образом, по результатам исследований разработана методика комбинированного радиофотонного измерительного преобразования и определение его основных методических погрешностей для квази-распределенной акустической шумометрии и расходомерии.

Литература

1. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Сахабутдинов А.Ж. и др. Радиофотонные двухчастотные способы интеррогации однотипных волоконных брэгговских решеток, объединенных в группу. - *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 20(2), 2017. - с.21-34.
2. Мисбахов Р.Ш., Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей. - *Инженерный вестник Дона*, 3, 2017. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4315.
3. Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах. - *Компьютерная оптика*, 43(4), 2019. - с.535-543.
4. Сахабутдинов, А.Ж., Нуреев И.И., Морозов О.Г. Уточнение положения центральной длины волны ВРБ в условиях плохого соотношения сигнал/шум. - *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 18(3-2), 2015. – Т. 18. - с.98-102.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЙ В ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ P-BOTDA

¹Барков Ф. Л., ¹Константинов Ю. А., ^{1,2}Бурдин В. В., ^{1,2}Кривошеев А. И.

¹ Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь;

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

EVALUATION OF TEMPERATURES AND STRAINS DISCRIMINATION POSSIBILITIES IN DATA OBTAINED BY THE P-BOTDA METHOD

Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Burdin V.V. Krivosheev A.I.

Аннотация

Авторами представлена модель определения зависимости точности метода разделения температур и деформации с помощью поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии, основанной на измерении бриллюэновского сдвига частоты в двух поляризационных осях волоконного световода, от инструментальных и калибровочных погрешностей.

Задача одновременного измерения температур и деформаций в распределенной сенсорике актуальна с точки зрения, как производственных, так и научных приложений. Существуют различные методики одновременного получения информации о температурных и деформационных воздействиях – это использование брэгговских решеток [1,2], использование деформированных волокон [3], поляризационно-бриллюэновская рефлектометрия [4,5], фазочувствительная рефлектометрия [6], многосердцевидные волокна [7].

В данной работе авторы ставили следующие задачи: первая – моделирование зависимости точности методики от калибровочных (невязка коэффициентов матрицы) и инструментальных (шаг сканирования и отношение сигнал/шум) погрешностей, вторая – экспериментальная проверка результатов моделирования на доступном оборудовании. В методе, представляемом в этой работе, две поляризационные оси оптического волокна рассматриваются как два независимых волокна, соответственно зависимости бриллюэновского сдвига частоты от температуры и деформации неодинаковы.

В общем случае, зависимость изменения бриллюэновского сдвига частоты двух поляризационных осей от температур и деформаций можно записать в виде:

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{pmatrix} \quad (1)$$

где f_1, f_2 – изменения бриллюэновского сдвига частоты для двух осей, обусловленные температурными ΔT и механическими $\Delta \varepsilon$ воздействиями; a_{ij} – частные производные от бриллюэновского сдвига по температуре и деформации, являющиеся соответствующими чувствительностями.

Для определения чувствительностей к температурам и деформациям было проведено калибровочное измерение при помощи исследовательского стенда (рис. 1А), состоящее из двух этапов. На первом этапе волокно в свободной намотке прошло термоциклирование с одночасовой выдержкой на температурах 25, 30, 40, 50 и 60°C для двух состояний поляризации. На втором этапе эксперимента часть свободно намотанного волокна была помещена в стенд, обеспечивающий заданные продольные натяжения. На участке волокна 1 м при постоянной температуре окружающей среды 25°C было осуществлено продольное растяжение с усилиями до 5 Н.

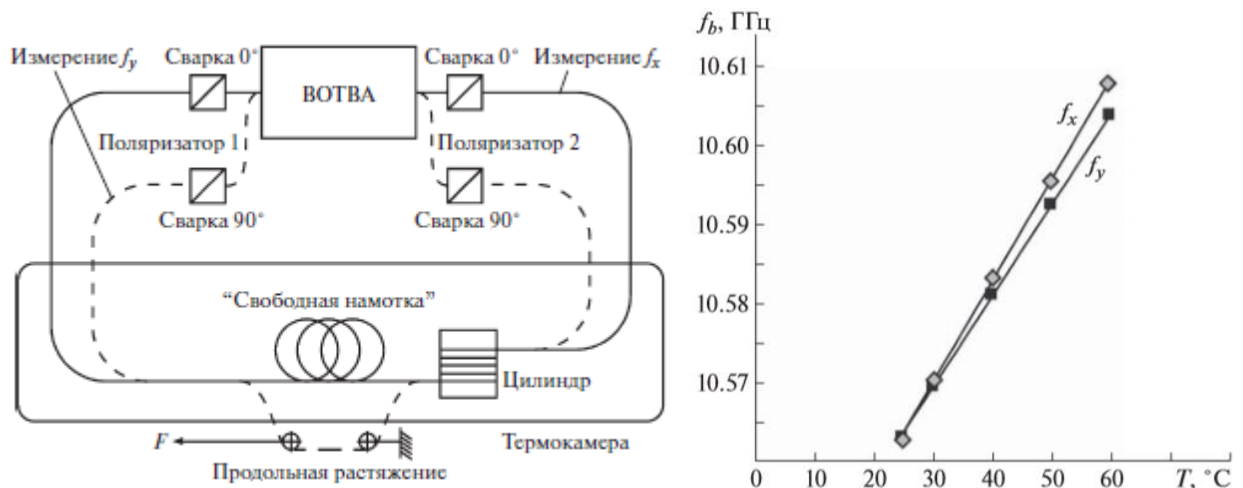


Рисунок 1. А) Исследовательский стенд поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии; Б) Зависимость бриллюэновских сдвигов f_x и f_y от температуры.

На рисунке 1Б представлены зависимости бриллюэновских сдвигов от температуры окружающей среды для каждой поляризационной оси оптического волокна. Зависимости для опыта с натяжением волокон выглядят аналогично, имея лишь несколько иной наклон по отношению к оси абсцисс.

Далее авторами были промоделированы погрешности, связанные с особенностями методики измерения и используемым оборудованием. На рисунке 2А представлены зависимости погрешности расчетного эксперимента от вводимых коэффициентов матрицы. Видно, что результаты неодинаково чувствительны к разным коэффициентам матрицы, но общий вид зависимости одинаков – чем больше погрешность коэффициентов матрицы, тем менее точно определяется температура.

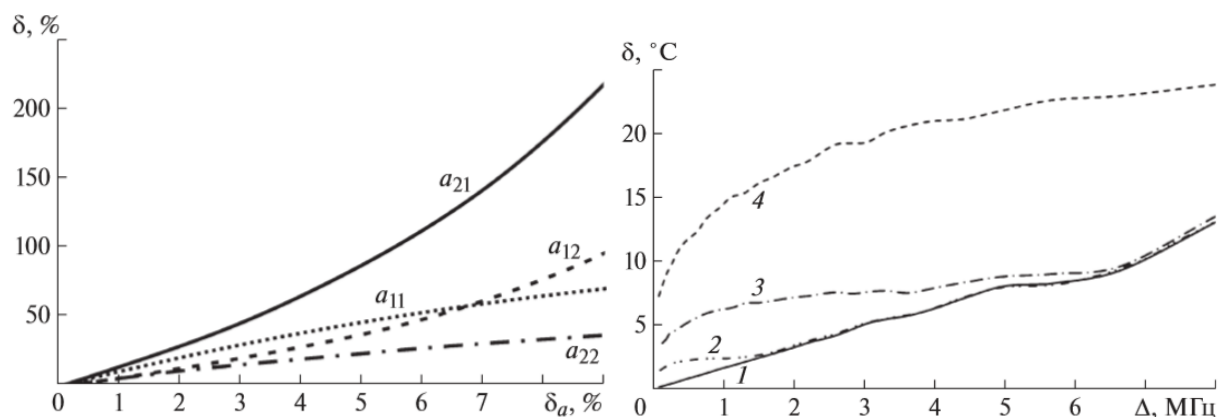


Рисунок 2. А) Зависимость погрешности расчетного эксперимента от погрешности ввода калибровочных коэффициентов; Б) Полученные моделированием погрешности определения температуры в зависимости от шага сканирования Δ и отношения сигнал/шум: 1 – шум отсутствует, 2 – с./ш. = 1000, 3 – с./ш. = 100, 4 – с./ш. = 10.

На рисунке 2Б представлены результаты моделирования погрешности определения температур и деформаций в зависимости от шага сканирования и соотношения сигнал/шум при определении сдвига бриллюэновского спектра. В отсутствие шума зависимость практически линейна, небольшие отклонения обусловлены лишь конечным количеством усредняемых данных. Однако добавление даже небольшого шума (с./ш. = 100) приводит к тому, что на начальном интервале график существенно искажается.

После проведения экспериментов авторами был произведен расчет температур и деформаций в оптическом волокне, результаты представлены на рис. 8.

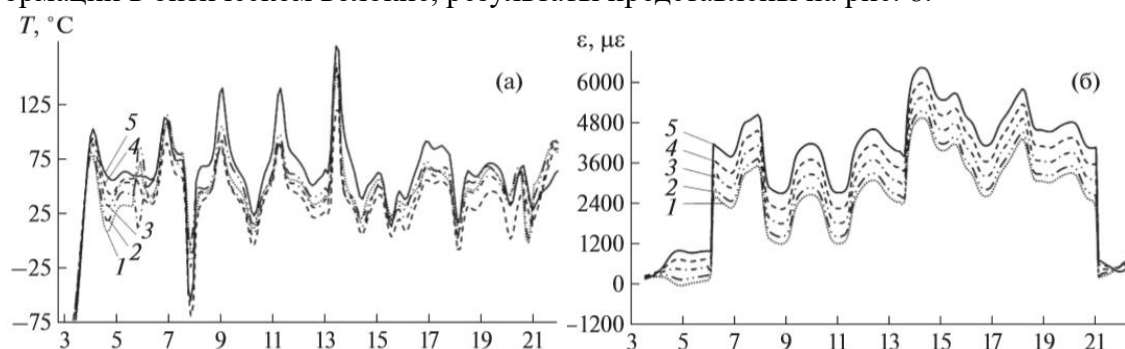


Рисунок 3. Результаты пересчета измеренных бриллюэновских сдвигов в температуру (а) и в деформацию (б) при температуре: 1 – 25°C, 2 – 30°C, 3 – 40°C, 4 – 50°C, 5 – 60°C.

Измерения в целом носят индикаторный характер (можно заметить изменения физических величин, но нельзя определить их точные значения). Это вполне согласуется с результатами моделирования – даже на однородных участках волокна при данных параметрах ($\Delta = 5$ МГц и с./ш. = 10) погрешность измерения температуры (рис. 2) может достигать 20°C.

Проведенные с использованием коммерчески доступного бриллюэновского анализатора эксперименты находятся в согласии с результатами моделирования. Авторы считают целесообразным повышать достоверность измерений путем пост-обработки полученного сигнала.

Литература

1. Ларин Ю.Т. Оптические кабели: методы расчета конструкций, материалы, надежность, стойкость к ионизирующему излучению. – Москва, 2007. – 304 с.
2. Мальке, Г. and Гессинг, П. Волоконно-оптические кабели. – Новосибирск, 2001. – 352 с.
3. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Оптический модуль - основа волоконно-оптического кабеля - Кабели и провода, 1(272), 2002. - с.22-25.

4. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК - Кабели и провода, 3(274), 2002. - с.32-34.
5. Chen H., Chen X., Yao X.S. Distributed fiber bend and stress measurement for determining optical fiber reliability by multi-wavelength optical reflectometry - US 2014/0362367, 2014.
6. Бурдин В.А. Способ измерения избыточной длины оптического волокна в оптическом модуле оптического кабеля в процессе климатических испытаний - RU2562141, 2015.
7. Бурдин В.А. Способ измерения распределения избыточной длины оптического волокна в модуле оптического кабеля - RU 2624796, 2017.

ДОСТИЖЕНИЕ 85-КИЛОМЕТРОВОЙ ДАЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ (ТЕМПЕРАТУРЫ) С ПОМОЩЬЮ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ РЭЛЕЕВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

^{1,2}Таранов М.А., ³Горшков Б.Г., ²Алексеев А.Э.

¹ООО «ПетроФайбер», г. Новомосковск;

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино;

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

ACHIEVEMENT OF AN 85 KM DISTANCE RANGE OF STRAIN (TEMPERATURE) MEASUREMENTS USING LOW-COHERENCE RAYLEIGH REFLECTOMETRY

Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E.

Аннотация

Продemonстрирована возможность измерения деформации (температуры) на дальностях до 85 км с доступом к оптическому волокну с одного конца с помощью технологии низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии. Указанная дальность обеспечена за счёт организации рамановского усиления излучения в комбинации с усилением с помощью встроенных в измеряемую линию коротких сегментов волокна, легированного эрбием.

Распределённые измерения деформации и температуры являются современным высокоинформативным методом мониторинга структурного состояния объектов, имеющих значительные размеры: мостов, трубопроводов и других сооружений инфраструктуры. Традиционно для этих целей используются распределённые датчики, действие которых основано на регистрации сигнала бриллюэновского рассеяния: рефлектометры BOTDR, а также анализаторы BOTDA [1, 2]. Было продемонстрировано, что для BOTDR за счёт использования встроенного в линию усилителя на основе оптического волокна, легированного эрбием, достижима дальность действия до 50 км [3].

Сравнительно новыми являются датчики механических и температурных воздействий, основанные на регистрации спектров рассеяния Рэлея [4 – 6]. В работе [7] нами предложена технология использования низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии с перестройкой длины волны излучения. Измерительные характеристики изученного в [7] датчика ограничены, главным образом, нелинейными эффектами в оптическом волокне [8]. При некотором их уровне удаётся достичь удовлетворительных точностных показателей на дальности до 25 км. Цель настоящей работы состояла в дальнейшем увеличении дальности измерений, реализуемых с помощью предложенной нами технологии.

Ранее продемонстрировано, что совместная организация рамановского усиления и усиления за счёт встроенных в волоконно-оптическую линию коротких сегментов волокна, легированного эрбием, позволяет существенно (до 100 км) увеличить дальность действия распределённого датчика вибраций [9]. Ввиду того, что разработанная нами технология низкокогерентной рефлектометрии использует только С-диапазон длин волн (1530 – 1565 нм), были основания полагать, что применение аналогичных мер позволит достичь поставленной цели.

Для экспериментальной верификации была собрана установка, аналогичная разработанной в [8] с тем лишь отличием, что был добавлен модуль оптической накачки для организации усиления в линии, состоявшей из четырёх бухт (Б) одномодового волокна, подключенных в следующей конфигурации: оптический порт установки – Б1 (длиной 25 км) – ЭВ1 – Б2 (25 км) – Б3 (10 км) – ЭВ2 – Б4 (25 км) – ОС (200 м), где ЭВ – короткие сегменты легированного эрбием волокна; ОС – оконечный сегмент. Рамановское усиление организовывалось только в Б1. ОС включал в себя прямую 9-метровую секцию, деформацию которой можно было изменять с высокой точностью.

Оценка точностных показателей, достижимых с помощью установки, была проведена по результатам серии измерений деформации 9-метровой секции ОС. На рис. 1 приведена полученная зависимость между измеренной деформацией и её реальными значениями. Высокая линейность и низкая стандартная неопределённость ($3,8 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$) измерений говорят о хорошем качестве установки как датчика. Рис. 2 даёт наглядное представление о зависимости стандартной неопределённости измерений от расстояния. Как видно, в худшем случае неопределённость составляет порядка $4\text{--}5 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$, что значительно лучше показателей, достижимых типичными BOTDR.

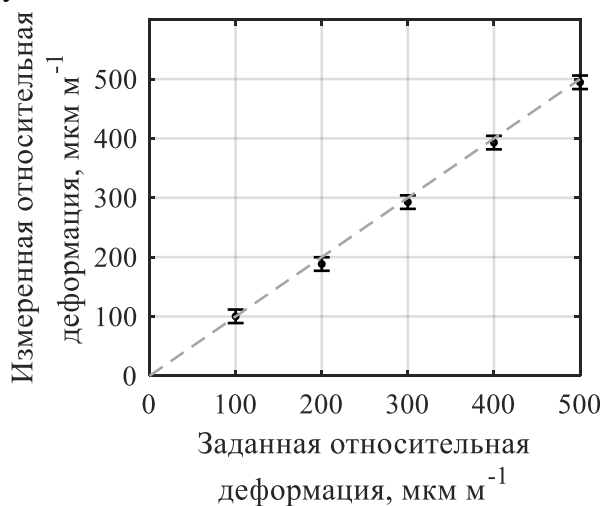


Рисунок 1. Зависимость между измеренной деформацией 9-метровой секции ОС и её реальными значениями (пунктиром отмечена идеализированная характеристика; перемычки соответствуют диапазону ± 3 стандартных неопределённостей).

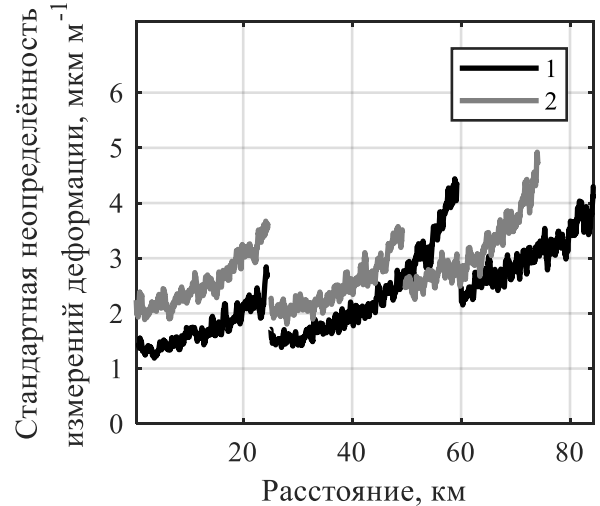


Рисунок 2. Оценка стандартной неопределённости измерений деформации вдоль волоконно-оптической линии с пространственным разрешением: 1 – 2,6 м; 2 – порядка 1 м.

Литература

1. Kurashima T., Horiguchi T. and Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers // *Opt. Lett.* 1990. Vol. 15, N 18. P. 1038–1040.
2. Parker T.R., Farhadiroushan M., Feced R., Handerek V.A. and Rogers A.J. Simultaneous distributed measurement of strain and temperature from noise-initiated Brillouin scattering in optical fibers // *IEEE J. Quant. Electron.* 1998. Vol. 34, N 4. P. 645–659.
3. Lalam N., Ng W.P., Dai X., Wu Q. and Fu Y.Q. Sensing range improvement of brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) using inline erbium-doped fibre amplifier // *2017 IEEE SENSORS*. 29 Oct. – 1 Nov. 2017. Glasgow. P. 1–3.

4. Froggatt M. and Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter // *Appl. Opt.* 1998. Vol. 37, N 10. P. 1735–1740.
5. Koyamada Y., Imahama M., Kubota K. and Hogari K. Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing With Very High Measurand Resolution Over Long Range Using Coherent OTDR // *J. Light. Technol.* 2009. Vol. 27, N 9. P. 1142–1146.
6. Liehr S., Münzenberger S. and Krebber K. Wavelength-scanning coherent OTDR for dynamic high strain resolution sensing // *Opt. Express*. 2018. Vol. 26, N 8. P. 10573–10588.
7. Gorshkov B.G., Taranov M.A. and Alekseev A.E. Distributed stress and temperature sensing based on Rayleigh scattering of low-coherence light // *Laser Phys.* 2017. Vol. 27, N 8. P. 085105.
8. Gorshkov B.G. and Taranov M.A. Nonlinear spectrum broadening and its impact on performance of Rayleigh-scattering-based distributed strain/temperature fiber optic sensors // *Laser Phys. Lett.* 2018. Vol. 15, N 11. P. 115108.
9. Van Putten L.D., Masoudi A. and Brambilla G. 100-km-sensing-range single-ended distributed vibration sensor based on remotely pumped Erbium-doped fiber amplifier // *Opt. Lett.* 2019. Vol. 44, N 24. P. 5925–5928.

О МИНИМАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ В ОДНОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ, ДОСТИЖИМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЭЛЕЕВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

^{1,2}Таранов М.А., ³Горшков Б.Г., ⁴Жуков К.М., ⁵Гринштейн М.Л.

¹ООО «ПетроФайбер», г. Новомосковск;

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино;

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва;

⁴ООО «Лаборатория электронных и оптических систем», г. Москва;

⁵ЗАО «Институт информационных технологий», г. Минск

ON THE MINIMUM UNCERTAINTY OF ATTENUATION COEFFICIENT MEASUREMENT IN A SINGLE-MODE OPTICAL FIBER ACHIEVABLE USING RAYLEIGH OTDR

Taranov M.A., Gorshkov B.G., Zhukov K.M., Grinshtein M.L.

Аннотация

Рассмотрен вопрос точности измерения коэффициента затухания в одномодовом оптическом волокне при помощи рэлеевской рефлектометрии. Теоретически установлено, что минимальная достижимая неопределённость таких измерений определяется только спектральными свойствами зондирующего излучения и убывает с возрастанием длины измеряемого волокна в степени 1,5. Статистический анализ результатов измерения коэффициента затухания в разных сегментах реального одномодового волокна по их рефлектограммам демонстрирует результаты, согласующиеся с теоретическими выводами. Полученные результаты устанавливают ограничения на минимальную длину волокна, коэффициент затухания в котором может быть измерен с требуемой точностью.

Для любой волоконно-оптической линии (ВОЛ) потери – одна из важнейших характеристик её качества. Задача определения потерь в большинстве случаев успешно решается при помощи рэлеевской рефлектометрии – методе распределённых измерений, дающем информацию не только об общей величине потерь, но и о вкладе в неё от каждого

компонента линии, а также об их местоположении [1]. В случае если аттестуемая ВОЛ представляет собой цельное однородное оптическое волокно (ОВ), задача измерений сводится к определению только погонных потерь, характеризуемых коэффициентом затухания α (дБ·км⁻¹).

В работе [2] нами было показано, что каждый отрезок ОВ обнаруживает устойчивые («вмороженные») шумоподобные флуктуации коэффициента обратного рассеяния Рэлея. В работе [3] получена статистическая оценка контраста рэлеевской рефлектограммы, описывающая размах этих флуктуаций. Цель настоящей работы состояла в определении минимально возможных ошибок измерения коэффициента затухания в зависимости от длины ОВ с учётом общепринятых методов расчёта этого коэффициента.

В стандартных импульсных рэлеевских рефлектометрах (Optical Time Domain Reflectometer – OTDR), используются, как правило, два метода расчёта коэффициента затухания α : по двум крайним точкам сегмента рефлектограммы (2-Point Approximation – 2PA) и по всем точкам сегмента с аппроксимацией данных по методу наименьших квадратов [4] (Least Squares Approximation – LSA). Сопоставление обоих методов выявляет, что при числе точек анализируемого сегмента рефлектограммы, большем шести, LSA обеспечивает большую точность измерения α , чем 2PA. С учётом того, что эта точность фундаментально ограничена упомянутыми выше флуктуациями коэффициента обратного рэлеевского рассеяния, и принимая во внимание результаты, полученные нами в работе [3], можно вывести следующее аналитическое выражение для минимальной стандартной неопределённости метода LSA:

$$\sigma_{\text{LSA}} \approx 4,2 \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{n\Lambda}} \cdot \frac{1}{L^{1,5}} \cdot \text{дБ}, \quad (1)$$

где λ – центральная длина волны зондирующего излучения; n – показатель преломления сердцевины ОВ; Λ – ширина спектра мощности зондирующего излучения по уровню полумаксимум (Full Width at Half Maximum – FWHM); L – длина ОВ.

Для экспериментальной верификации теоретических выводов нами была разработана специальная рефлектометрическая установка. Её характеристики соответствовали допущениям, принятым при выводе указанного выше выражения. На рис. 1 приводится сопоставление стандартной неопределённости σ_{LSA} , рассчитанной теоретически, и неопределённости, полученной экспериментально путём измерения α по многим отрезкам реального ОВ для нескольких групп длин. Как видно, теоретический результат хорошо согласуется с экспериментальным. Для сравнения также приведён результат, полученный аналогичным образом с помощью выпускаемого серийно OTDR Agizer FX300 (Беларусь).

Радикальное повышение точности измерения коэффициента затухания относительно установленных пределов возможно, если перейти на регистрацию в полосе бозоновского спектра рассеяния Рамана [5].

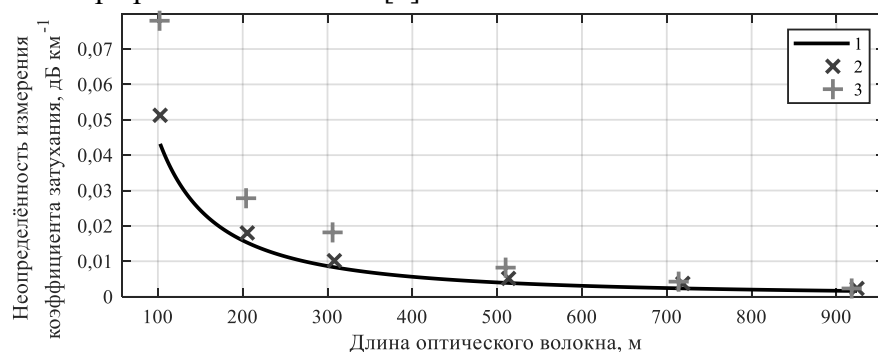


Рисунок 1. Зависимость стандартной неопределённости измерения коэффициента затухания по методу LSA от длины ОВ: 1 – теоретическая оценка ($n = 1,47$, $\lambda = 1563$ нм и $\Lambda = 15$ нм); 2 – экспериментальная для установки собственной разработки; 3 – экспериментальная для прибора Agizer FX300.

Литература

1. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.
2. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Гринштейн М.Л. и Таранов М.А. Ограничение точности измерения потерь излучения в одномодовых волокнах: "вмороженные" неоднородности коэффициента обратного рэлеевского рассеяния // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 1. С. 83–86.
3. Gorshkov B.G., Taranov M.A. and Alekseev A.E. Distributed stress and temperature sensing based on Rayleigh scattering of low-coherence light // Laser Phys. 2017. Vol. 27, N 8. P. 085105
4. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 349 с.
5. Горшков Б.Г., Горшков Г.Б. и Жуков К.М. Прецизионное измерение потерь в оптических волокнах малой длины рефлектометрическим методом без использования рэлеевского рассеяния света // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 6. С. 581–584.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЦЕЛЬНОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ, СОЗДАННОГО ПРИ ПОМОЩИ ЭФФЕКТА ПЛАВЛЕНИЯ

¹Конин Ю.А., ^{1,4}Булатов М.И., ²ЩербакOVA В.А., ³Гаранин А.И., ³Токарева Я.Д.,
¹Мошева Е.В.

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания
"ПНППК", г. Пермь;

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь;

³Университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург;

⁴Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF AN ALL-FIBER TEMPERATURE SENSOR CREATED USING THE MELTING EFFECT

Konin Yu.A., Bulatov M.I., Shcherbakova V.A., Garanin A.I. Tokareva Ya.D., Mosheva E.V.

Аннотация

В статье исследуется температурная чувствительность цельноволоконного датчика температуры, созданного при помощи эффекта плавления. С целью изучения зависимости был разработан и собран специальный макет для проверки чувствительности датчиков к изменению температуры. При проведении экспериментов получены температурные зависимости спектрального сдвига для датчика в диапазонах температур 30-90 °С и 20-320 °С. В ходе исследования был получен график зависимости спектра от температуры и построен калибровочный график. Таким образом, определена температурная чувствительность датчика, которая составила ≈ 16 нм/°С. Получены результаты прочности световода в акрилатном покрытии до и после испытаний с помощью метода осевого растяжения. Обнаружено, что предельная прочность световода ухудшается более чем в 2 раза при воздействии высокой температуры.

Большинство медицинских волоконных зондов для измерения температуры имеет диапазон измерения от 20 до 90 градусов Цельсия, кроме того используемые в эксперименте волокна имели акрилатное покрытие, которое имеет свойство разрушаться при температурах выше 90 °С. Поэтому в первом эксперименте было решено измерить поведение термочувствительного волокна в диапазоне 30-90 °С, с шагом 10 °С.

Сдвиг спектра микрополости определяется по минимуму в диапазоне длин волн 1537-1541 нм. Зависимость сдвига спектра носит характер близкий к линейному [1]. Чувствительность датчика в этом случае составила $13,6 \pm 0,7$ пм/°С. В случае с большим шагом в измерениях, при анализе отраженных спектров возникают сложности в определении максимумов и минимумов отраженного спектра, поэтому рекомендуется строить двумерные теплограммы, в которых визуальнее проще определять сдвиг спектра, или пользоваться Фурье-преобразованиями при его анализе. После выдержки световода при температуре 320 °С его защитное покрытие изменило цвет и стало «черным». Это связано с деструкцией акрилата, так как его рабочая температура находится в диапазоне от -40 до +85 °С. Поэтому световоды для применения в экстремальных средах часто покрываются материалами, способными выдерживать высокие рабочие температуры. Одним из таких материалов является полиимид, его превосходные свойства термостойкости [2], высокой адгезии к кварцу и твердости позволяют использовать световоды при температуре 300 – 350 °С. До испытаний световод имел предельную прочность ~5,84 ГПа, а после ~2,70 ГПа. Предельная прочность до испытаний отлично коррелирует с литературными данными ~5,40 ГПа [3], ~5,10 ГПа [4]. Таким образом, акрилатное покрытие не подходит под такие задачи, целесообразно акцентировать внимание между полиимидным и металлическим защитно-упрочняющим покрытием.

В ходе исследования разработан и собран специальный макет для проверки чувствительности датчиков к изменению температуры. При проведении экспериментов были получены температурные зависимости спектрального сдвига для датчика в диапазонах температур 30-90 градусов и 20-320 градусов Цельсия.

В результате исследования характеристик одномодового радиационно-стойкого рассеивателя получены калибровочные графики зависимости спектра от температуры, и определена температурная чувствительность, которая составила $15,7 \pm 0,7$ пм/°С. В сравнении с решетками Брегга, которые имеют чувствительность около 12 пм/°С. Предельная прочность световода в акрилатном покрытии после испытаний уменьшилась, поэтому для долговечности датчика необходимо использовать в качестве покрытия полиимид или металлы.

В дальнейшем планируется создать и изучить датчик на основе волокна покрытого полиимидным и металлическим покрытием.

Литература

1. Sergei L. Semjonov, G. Scott Glaesemann, Donald A. Clark and Mikhail M. Bubnov, *Effect of environmental conditions on fatigue of weak silica-clad optical fibers*, Proc SPIE. 5465, 2004, p. 61-67.
2. Fuse effect investigation in optical fiber for creation optical sensor structure / V.A. Shcherbakova, S.S. Starikov, Y.A. Konin, A.I. Garanin, D.I. Nurmuhametov // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. – 2019. – p. 914 – 916. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657220.
3. Research the thermal sensitivity of a fiber optic sensor created with the catastrophic fuse / Y.A. Konin, A.I. Garanin, D.I. Nurmuhametov, S.F. Turin, V.A. Shcherbakova // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. – 2019. – p. 897 – 900. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8656714.
4. Dipak R.Biswas, *Optical fiber coatings for biomedical applications*, Optical engineering, Vol. 31, No. 7, 1992, p. 1400 – 1403.
5. Andrei A. Stolov, Debra A. Simoff and Jie Li. *Thermal stability of specialty optical fibers*, Journal of lightwave technology, Vol. 26, No. 20, 2008, p. 3443 – 3451.
6. B. Delobelle, V. Placet, D. Chapelle, F. Thiebaud, D. Perreux, R.Ferriere, *Analysis of the failure probability of an optical fibre under tensile loading*, Journal of Lightwave Technology, 1989, p.1360-1369.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ФАЗОВОГО OTDR: СХЕМЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА, ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Горшков Б. Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

PHASE OTDR: SIGNAL RECOVERY METHODS, COMPARATIVE CHARACTERISTICS, SOURCES OF ERRORS, APPLICATIONS

Gorshkov B. G.

В докладе дается сравнительный анализ известных к настоящему времени схем восстановления сигналов внешних воздействий в фазовых когерентных рефлектометрах (phase-sensitive Distributed Vibration Sensors, DVS): с использованием ответвителя 3х3 [1], фазовой манипуляции [2], частотной манипуляции [3], гетеродинных схем [4], и с chirпированными зондирующими импульсами [5]. Показано, что восстановление формы акустических сигналов возможно только в случае совместной регистрации сигналов с двух смежных каналов дальности независимо от конкретной схемы восстановления. Обсуждается проблема фединга полезного сигнала, рассмотрены три источника фединга, приводятся способы решения проблемы.

Особое внимание в докладе уделяется классификации погрешностей, возникающих в фазовых DVS, а именно вариациям амплитуды, фазы, частотной характеристики и нелинейным искажениям [6, 7]. Дается простая качественная интерпретация причин появления этих погрешностей.

Обсуждаются ограничения, возникающие из-за характерных для DVS нелинейных эффектов – модуляционной нестабильности и фазовой самомодуляции. Отдельно обсуждается возможность квазистатических измерений деформации или температуры с применением фазовых DVS [8]. Обращается внимание на источники погрешностей при такого рода измерениях. Анализируется возможность использования рефлектометра, работающего на низкокогерентном излучении, для статических измерений изменения деформаций или температуры [9]. Формулируются основные направления технического совершенствования фазовых DVS. Приводятся примеры практического использования фазовых DVS в геофизических исследованиях, выполнении охранных функций, определении координат подвижных объектов.

Литература

1. Farhadiroushan M., Parker T.R. and Shatalin S. Method and apparatus for optical sensing // Patent N WO2010/136810 A2. 2010.
2. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T. and Simikin D.E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal // Laser Physics. 2014. Vol. 24, N 11. P. 115106. <https://doi.org/10.1088/1054-660X/24/11/115106>.
3. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T. and Simikin D.E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse diverse frequency probe signal // Laser Physics. 2015. Vol. 25, N 6. P. 065101. <https://doi.org/10.1088/1054-660X/25/6/065101>.
4. Liokumovich L.B., Ushakov N.A., Kotov O.I., Bisyarin M.A. and Hartog A.H. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: Signal model under static fiber conditions // J. Lightwave Technol. 2015. Vol. 33, N 17. P. 3660–3671. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2449085>.
5. Pastor-Graells J., Martins H.F., Garcia-Ruiz A., Martin-Lopez S. and Gonzalez-Herraez M. Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with

- chirped pulses // Opt. Express. 2016. Vol. 24, N 12. P. 13121–13133. <https://doi.org/10.1364/OE.24.013121>.
6. Alekseev A.E., Gorshkov B.G. and Potapov V.T. Fidelity of the dual-pulse phase-OTDR response to spatially distributed external perturbation // Laser Physics. 2019. Vol. 29, N 5. P. 055106. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab0d15>.
 7. Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A. and Simikin D.E. Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance // Laser Physics. 2020. Vol. 30, N 3. P. 035107. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab70b0>.
 8. Nikitin S.P., Kuzmenkov A.I., Gorbulyan V.V., Nanii, O.E. and Treshchikov V.N. Distributed temperature sensor based on a phase-sensitive optical time-domain Rayleigh reflectometer // Laser Physics. 2018. Vol. 28, N 8. P. 085107. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aac714>
 9. Gorshkov B.G., Taranov M.A. and Alekseev A.E. Distributed stress and temperature sensing based on Rayleigh scattering of low-coherence light // Laser Physics. 2017. Vol. 27, N 8. P. 085105. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa792f>.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ БУКСИРУЕМОЙ КОСЫ ДЛЯ МОРСКИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

¹Власов А.А., ¹Плотников М.Ю., ¹Алейник А.С., ¹Лавров В.С., ¹Аширов А.Н.,
¹Никитенко А.Н., ^{1,2}Варламов А.В., ¹Кикилич Н.Е., ¹Киселев С.С.
¹Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург;
²ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург

IMPROVING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF A FIBER-OPTIC SONAR TOWED STREAMER FOR MARINE GEOPHYSICAL EXPLORATION AND SEISMIC EXPLORATION

Vlasov A.A., Plotnikov M.Yu., Aleinik A.S., Lavrov V.S., Ashirov A.N.,
Nikitenko A.N., Varlamov A.V., Kikilich N.E., Kiselev S.S.

Аннотация

В настоящей работе рассматриваются различные способы повышения точностных характеристик волоконно-оптических измерительных систем при их работе в условиях воздействия внешних акустических и вибрационных шумов. Результаты работы могут быть применены как на стадии проектирования новых, так и в порядке модернизации существующих измерительных систем.

В настоящее время измерительные системы на основе волоконно-оптических фазовых датчиков (волоконно-оптические гироскопы, датчики тока и напряжения, гидроакустические антенны и многие другие) получают все более широкое распространение в различных отраслях науки и техники ввиду своих достоинств: низкие массогабаритные параметры, высокая чувствительность, взрыво- и пожаробезопасность (оптическое волокно является диэлектриком), нечувствительность к внешнему электромагнитному полю (чрезвычайно высокая помехозащищенность), возможность размещения в агрессивных средах (температурное воздействие, химическая активность и т.д.), возможность мультиплексирования большого количества датчиков на одном волокне (создание пространственных измерительных массивов).

Однако при работе волоконно-оптических интерферометрических систем в реальных условиях их точностные характеристики могут снижаться по причине акустических и вибрационных воздействий на опорный оптический канал.

Данная работа посвящена исследованию способов снижения влияния внешних акустических и вибрационных влияний на компоненты волоконно-оптической гидроакустической буксируемой косы для морских геофизических исследований и сейсмической разведки.

В ходе данной работы были достигнуты следующие результаты:

- Проведен обзор способов снижения акустических и вибрационных воздействий на чувствительные элементы их классификация по признаку сложности их промышленного внедрения – от тех, применение которых должно быть заложено на стадии проектирования измерительных систем до тех, применение которых возможно в рамках модернизации уже введенных в эксплуатацию систем;
- Предложена математическая модель, позволяющая выполнять расчет снижения уровня звукового давления внутри акустически подготовленного защитного корпуса устройства в зависимости от его параметров: геометрических размеров, применяемых конструкционных, звукозащитных и вибропоглощающих материалов. Сходимость результатов моделирования с результатами эксперимента составила 0,908. Применение разработанного корпуса позволяет достичь снижения внешнего акустического воздействия в среднем на 18 дБ, вибрационного – от 15 до 39 дБ в диапазоне частот от 20 до 5000 Гц;
- Разработана подвесная система для защиты от вибрационных воздействий, позволяющая при совместном применении с разработанным защитным корпусом достичь снижение уровня акустического воздействия до 21 дБ, вибрационного – от 38 до 51 дБ в диапазоне частот от 20 до 5000 Гц;
- Проведено исследование эффективности снижения внешних акустических воздействий при помощи защитных покрытий оптического волокна, совместимых со стандартными технологиями кабельной промышленности. Наиболее эффективное покрытие на основе оптического кабеля с тросовым бронированием позволяет достичь снижения внешнего акустического воздействия от 17 до 27 дБ в диапазоне частот от 20 до 5000 Гц.

Литература

1. Udd E., Spillman Jr W. B. (ed.). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. – John Wiley & Sons, 2011.
2. Hocker G. B. *Fiber-optic sensing of pressure and temperature* // *Applied optics*. – 1979. – Т. 18. – №. 9. – С. 1445-1448.
3. McMahon G. W., Cielo P. G. *Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations* // *Applied optics*. – 1979. – Т. 18. – №. 22. – С. 3720-3722.
4. Vlasov A.A., Aleynik A.S., Ashirov A.N., Plotnikov M.Yu., Varlamov A.V. // *Technical Phys. Lett.* 2019. V. 45. № 8. P. 769. <https://doi.org/10.1134/S1063785019080157>.
5. Vlasov, A. A., Plotnikov, M. Y., Aleinik, A. S., Varlamov, A. V // *J. Phys.: Conference Series. IOP Publishing*, 2019. V. 1326. № 1. P. 012010. doi:10.1088/1742-6596/1326/1/012010
6. Vlasov, A. A., Plotnikov, M. Y., Ashirov, A. N., Aleynik, A. S., Varlamov, A. V., Stam, A. M // *2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. IEEE. 2019. P. 305. DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906889.
7. Власов, А. А., Алейник, А. С., Плотников, М. Ю., Дмитриев, А. А., Варжель, С. В. (2019). Методы снижения механических шумовых воздействий при буксировке сейсмических кос с применением волоконных решеток Брэгга. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 19(4).
8. Власов, А. А., Алейник, А. С., Шуклин, Ф. А., Никитенко, А. Н., Моторин, Е. А., Киреевков, А. Ю. (2019). Обнаружение ультразвуковых воздействий с применением волоконных решеток Брэгга. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 19(5).

9. Власов, А. А., Алейник, А. С., Моторин, Е. А., Плотников, М. Ю., Волковский, С. А. (2017). Способы защиты чувствительных волоконно-оптических узлов от внешних шумов и вибраций. // Наука и инновации в технических университетах (стр. 7-8).
10. Власов, А. А., Алейник, А. С., Плотников, М. Ю., Аширов, А. Н., Моторин, Е. А. (2018). Исследование способов повышения точностных характеристик волоконно-оптической сейсмической косы. // Наука и инновации в технических университетах (стр. 8-9).
11. Алейник, А. С., Власов, А. А., Аширов, А. Н. (2019). Методы защиты волоконно-оптических интерферометров от воздействия акустических шумов окружающей среды. // Защита от повышенного шума и вибрации (стр. 285-300).

ТОЧНОСТЬ ОТКЛИКА ФАЗОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

¹Алексеев А.Э., ²Горшков Б.Г., ¹Потапов В.Т., ^{1,3}Таранов М.А., ^{1,3}Симикин Д.Е.

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино;

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

³ООО «Петрофайбер», г. Москва

PHASE REFLECTOMETER RESPONSE ACCURACY

Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Taranov M.A., Simikin D.E.

Аннотация

В работе рассматривается концепция точности отклика когерентного фазового рефлектометра на внешнее воздействие. Под точностью понимается линейность отклика рефлектометра и дисперсия этого отклика, характеризующая его случайность. В результате снижения точности отклика сигнал внешнего воздействия воспроизводится рефлектометром с искажениями по амплитуде, фазе (временной задержке) и спектральному составу. На практике данные искажения приводят к ошибкам измерений, например, при определении времени первого вступления волны в геофизических исследованиях. В работе предложена теоретическая модель, описывающая возникающие искажения, а также рассмотрены важные частные случаи: малого неоднородного и однородного натяжения оптического волокна, вызванного внешним воздействием. Для рефлектометра с двойным зондирующим импульсом (dual-pulse phase-OTDR) проведена серия экспериментов, результаты которых хорошо согласуются с теоретическими выводами и результатами проведенного математического моделирования.

Откликом фазового рефлектометра на внешнее воздействие в некотором пространственном канале является соответствующее изменение фазы обратно-рассеянного оптического поля, вызванное этим воздействием. Точность отклика снижается из-за нелинейных случайных искажений, возникающих в силу того, что сигнал обратного рассеяния формируется в рефлектометре рассеивающими участками, имеющими некоторую протяженность [1,2]. При внешнем воздействии рассеивающий участок испытывает натяжение (в общем случае неоднородное), а фаза суммарного рассеянного оптического поля нелинейным случайным образом связана с внешним воздействием. В итоговый отклик рассматриваемого в работе рефлектометра с двойным зондирующим импульсом помимо нелинейного случайного вклада рассеивающих участков входит еще и линейный детерминированный вклад, обусловленный изменением натяжения участка волокна, разделяющего рассеивающие участки [2, 3]. Линейный вклад является полезным сигналом, а нелинейный случайный вклад снижает точность отклика фазового рефлектометра.

Теоретическое описание нелинейных случайных искажений отклика рефлектометра может быть произведено с использованием теории коррелированных спекл-структур [4]. В общем виде, когда внешнее воздействие имеет произвольную форму и амплитуду, итоговый отклик рефлектометра и его статистические характеристики могут быть рассчитаны только численными методами [5]. В некоторых частных случаях можно получить аналитическое выражение для среднего значения отклика рефлектометра. Например, в практически важном случае однородного натяжения рассеивающих участков средний отклик рефлектометра становится линейным относительно внешнего воздействия [4]. Данная особенность позволяет производить более точные измерения внешних воздействий, а также создавать датчики температуры на основе фазовых рефлектометров [6]. На рис.1 показана экспериментальная установка фазового рефлектометра, в которой производилось возбуждение распространяющегося вдоль оптического волокна возмущения и его регистрация [5]. Длительность частот зондирующего импульса, а также задержка между ними составляла 100 нс. Результаты эксперимента показаны на рис. 2. Одинаковое возмущение волокна, возбуждаемое множество раз, всегда приводило к новому случайному отклику (рис. 2 слева), наложение всех откликов (рис 2. справа) показывает, что время прихода возмущения к какому-либо пространственному каналу всегда регистрируется с ошибкой. Результаты проведенного моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

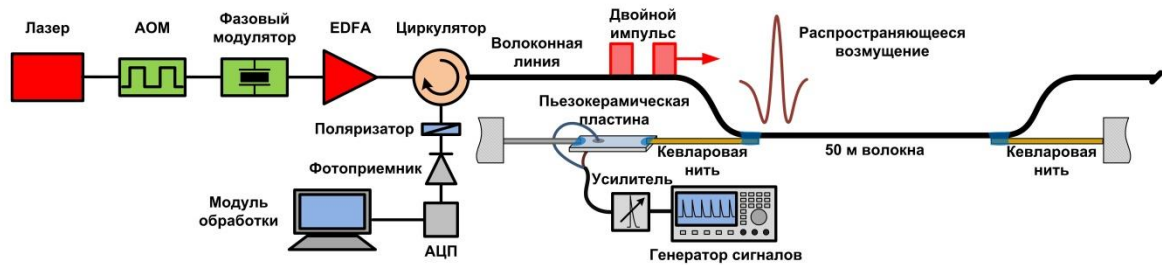


Рисунок 1. Экспериментальная установка.

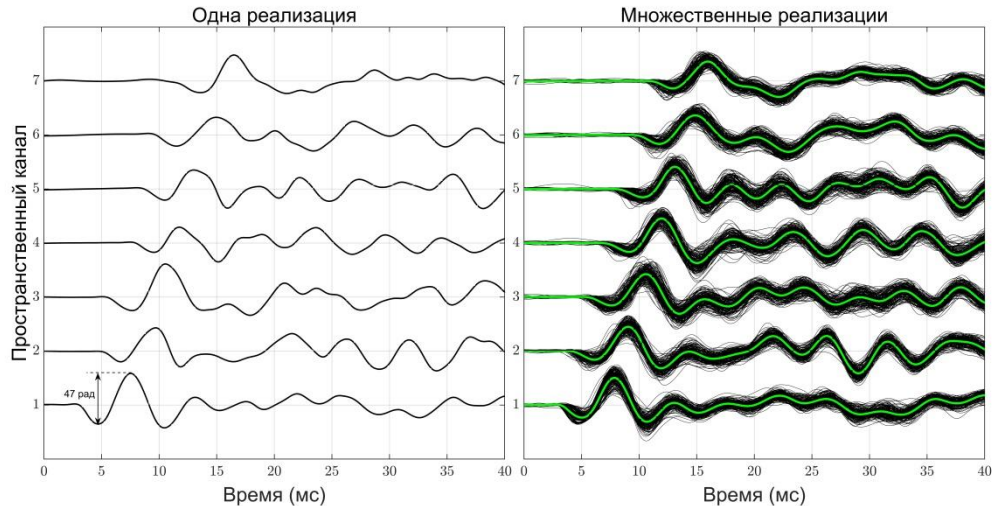


Рисунок 2. Экспериментальные данные.

Литература

1. Hartog A, Kader K 2015 U.S. Patent No. 9,170,149. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
2. Hartog A H An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors.- Boca Raton, RL: CRC Press, 2017 -440 p.
3. Hartog A H, Kotov O I, Liokumovich L B The optics of distributed vibration sensing 2nd EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring, 2013—Current and Future Trends.
4. Alekseev, A. E., Gorshkov, B. G., Potapov, V. T. Fidelity of the dual-pulse phase-OTDR response to spatially distributed external perturbation- Laser Physics, 29(5), 2019. -p. 055106.

5. Alekseev, A. E., Gorshkov, B. G. Potapov, V. T. Taranov M.A. Simikin D.E. Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance - *Laser Physics*, 30(3), 2020. -p. 035107.
6. Nikitin, S. P., Kuzmenkov, A. I., Gorbulyenko, V. V., Nanii, O. E., Treshchikov, V. N. Distributed temperature sensor based on a phase-sensitive optical time-domain Rayleigh reflectometer - *Laser Physics*, 28(8), 2018. - p 085107.

РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

^{1,2}Белокрылов М.Е., ¹Константинов Ю.А., ^{1,3}Латкин К.П., ¹Клод Д., ^{3,4}Селезнев Д.А.,
³Степин А.А., ^{3,4}Конин Ю.А., ²Щербакова В.А., ⁴Кашина Р.Р.

¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь;

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь;

³Пермский Национальный исследовательский политехнический университет, Пермь;

⁴Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК), Пермь

REFLECTOMETRY METHOD FOR MEASURING THE LENGTH OF ACTIVE OPTICAL FIBERS

Belokrylov M.E., Konstantinov Yu.A., Claude D., Seleznev D.A.,
Stepin A.A., Konin Yu.A., Shcherbakova V.A., Kashina R .R., Latkin K.P.

Аннотация

Сконструирован экспериментальный стенд на основе иттербиевого импульсного лазера с пассивным затвором на гольмиевом волокне, обеспечивающий рефлектометрическое исследование во временной области образцов активных эрбиевых волокон.

Производство активных оптических волокон, в силу технологических особенностей, не предполагает точного контроля длины полученного световода. Активный волоконный световод, длина которого неточно зарегистрирована, поступает на производство волоконных лазеров или усилителей. В различных оптоэлектронных устройствах используется различная длина активного волокна и зачастую подбирается экспериментально, а значит, каждый раз отматывается с запасом. Это приводит к накоплению ошибки длины катушки в десятки метров. С учетом стоимости эрбиевых волокон данная ошибка является коммерчески значимой, особенно если речь идет о специальных волокнах типа Panda или GT-wave.

Стандартным методом для быстрой оценки длины оптоволокна является оптическая рефлектометрия во временной области. Однако большинство коммерческих рефлектометров работают на длине волны 1550нм, что делает невозможным применение данного метода для эрбиевых волокон в силу огромного коэффициента поглощения на данной длине волны. В ходе работы был проведен эксперимент по исследованию эрбиевого световода рефлектометром Yokogawa AQ7260, излучающем на длине волны 1310нм. Коэффициент поглощения эрбиевого оптоволокна в области 1310нм значительно ниже, чем в 1550нм, что позволило предположить реализуемость такого подхода. Проведенный эксперимент показал, что максимальная длина измеряемого таким образом световода не превышает 200 метров, чего, очевидно, недостаточно для измерения волокон длиной в единицы километров.

Для решения задачи рефлектометрического исследования длин эрбиевых волокон был сконструирован иттербиевый импульсный лазер на длину волны 1080нм с пассивным гольмиевым затвором[1,2] и схема детектирования и обработки сигнала (рис. 1).

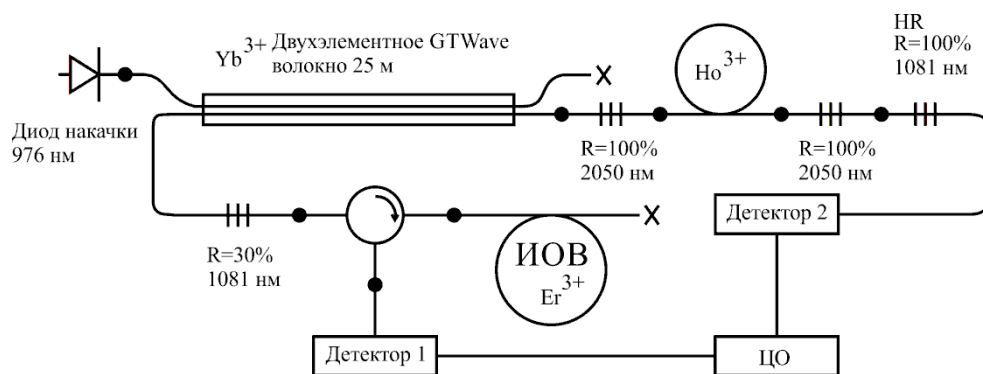


Рисунок 1. Схема рефлектометра на основе импульсного иттербиевого лазера с пассивным затвором. ЦО – цифровой осциллограф, ИОВ – исследуемый образец волокна.

Использованная длина волны находится в области минимума поглощения эрбиевого волокна. Применение в качестве насыщающегося поглотителя отрезка гольмиевого волокна позволило получить импульсный режим работы лазера с длительностью импульса порядка 100нс и периодом повторения около 10мкс.

Сконструированная установка была применена для рефлектометрического исследования эрбиевого волоконного световода длиной около 850 метров (рис 2).

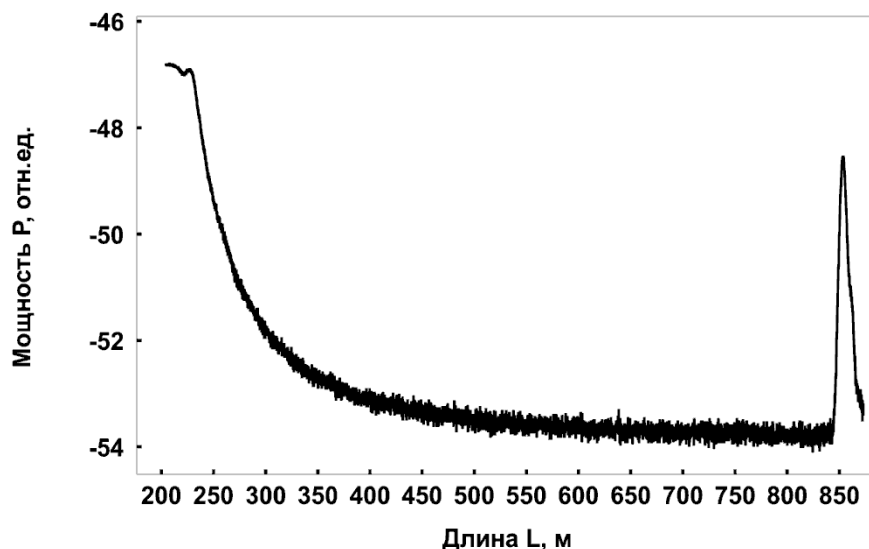


Рисунок 2. Рефлектограмма активного эрбиевого волоконного световода.

На рефлектограмме четко локализуется отражение от дальнего конца световода, что позволяет однозначно судить о применимости иттербиевого лазера для поставленной задачи. Вид рефлектограммы в логарифмических единицах отличен от линейного, что может являться следствием прямого проникновения излучения лазера на выходной порт циркулятора либо специфичным видом оптических потерь в волокне. Также был проведен эксперимент по контролируемому укорачиванию активного световода и измерению изменения его длины с помощью построенного макета. В результате получено абсолютное отклонение в измерении длины равное 1.82м. Доработка установки с целью снижения шумов поможет более точно измерять длину эрбиевого световода, а также регистрировать и измерять дефекты и неоднородности в активном эрбиевом волокне.

Литература

1. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I. // *Laser Phys. Lett.* 2009. № 6. P. 135.
2. Курков А.С., Шолохов Е.М. // *3-й Российский семинар по волоконным лазерам: Сборник трудов.* 31 марта–2 апреля 2009. Уфа, Россия. 2009. С. 54.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО И ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

^{1,2}Фадеев К. М., ¹Ларионов Д. Д., ^{1,2}Жикина Л. А., ^{1,2}Минкин А. М., ^{1,2}Шевцов Д. И.

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь;

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

FIBER OPTICAL SENSOR FOR SIMULTANEOUS TEMPERATURE AND PRESSURE MEASUREMENT USING A FABRY-PEROT INTERFEROMETER AND A FIBER BRAGG GRATING

Fadeev K. M., Larionov D. D., Zhikina L. A., Minkin A. M., Shevtsov D. I.

Аннотация

В работе представлен датчик одновременного измерения давления и температуры, выполненный полностью из кварцевых компонентов и с использованием интерферометра Фабри-Перо (ИФП) и волоконной брэгговской решетки (ВБР). Такая комбинация позволяет одновременно измерять температуру и давление, а также снизить вклад температуры в измерение давления. Использование ВБР в качестве термокомпенсирующего элемента позволяет снизить СКО показаний измерения давления датчика в примерно 7 раз (с 3.5 бар до 0.66 бар).

Волоконно-оптические датчики используются для измерения физических величин в системах с экстремальными условиями среды. Для измерения давления используются датчики, чувствительным элементом которых является интерферометр Фабри-Перо [1, 2]. Однако изменение температуры окружающей среды сильно влияет на показания такого датчика. В работе предлагается решение данной проблемы использованием одновременного измерения температуры датчиком на основе ВБР и использование этого датчика в качестве термокомпенсирующего элемента.

Схема разрабатываемого датчика и распространения излучения в нем представлена на рис. 1. Упругая мембрана и ферула выполнены из кварцевого стекла КУ-1. Толщина тонкой части мембраны составляла 50 ± 1 мкм.

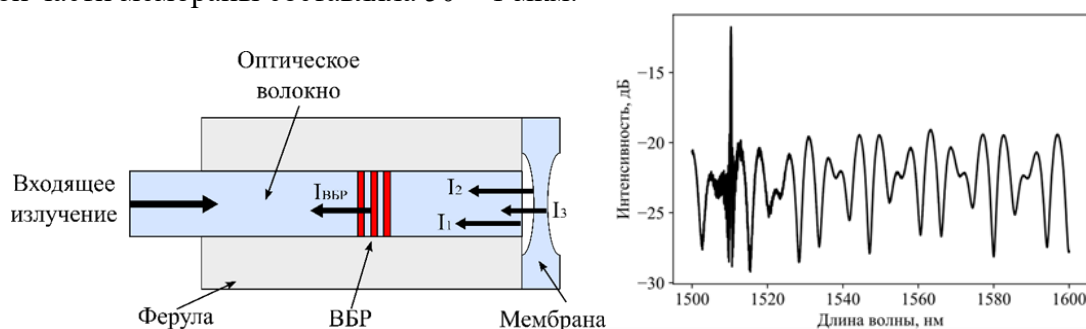


Рисунок 1. Схема и сигнал чувствительного элемента датчика давления и температуры.

Обратные отражения от торца ОВ, внутренней и внешней поверхностей мембраны возвращаются в систему опроса, где взаимодействуют между собой и формируют на фотоприемнике интерференционную картину. Для трехлучевого низкокогерентного интерферометра она формируется по уравнению:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) - 2\sqrt{I_2 I_3} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + 2\sqrt{I_3 I_1} \cos\left(\frac{4\pi(L + nd)}{\lambda}\right),$$

где I_1 , I_2 , I_3 – интенсивность света от отражений торца ОБ, внутренней и внешней поверхности мембраны, L – база интерферометра, d – толщина мембраны, n – показатель преломления материала мембраны, λ – длина волны излучения.

Вид интерференционной картины в основном зависит от базы интерферометра L – длины воздушного зазора между торцом ОБ и поверхностью мембраны. При воздействии внешнего давления происходит прогиб мембраны, вследствие чего изменяется база интерферометра L , изменение периода интерференционной картины и её смещение в целом.

Для проверки термокомпенсирующего элемента датчик был установлен в барокамере и термокамере, где на него воздействовали одновременно и давление, и температура. Данные о температуре датчика были сняты сигнала ВБР, а данные о давлении – с интерферометра Фабри-Перо. После испытаний формировались калибровочные уравнения датчика для каждой температуры. Показания датчика в виде прогиба мембраны на каждой температуре переводились в показания давления по этим калибровочным уравнениям.

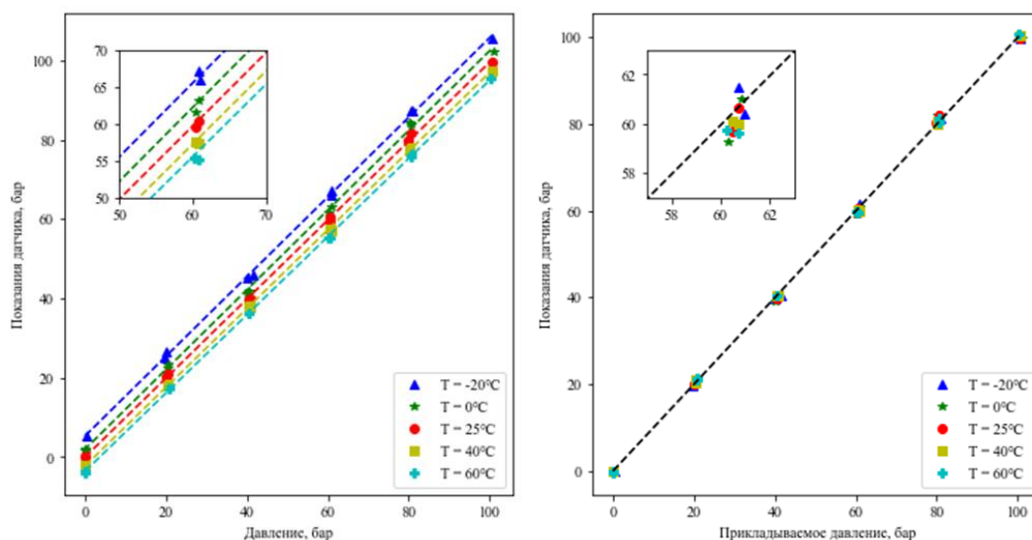


Рисунок 2. Работа датчика при разной температуре без использования и с использованием термокомпенсирующего алгоритма.

Использование термокомпенсации заметно снижает разброс значений показания датчика давления (рис. 2). СКО показаний без использования термокомпенсации составляет 3.5 бар, а с термокомпенсацией – 0.66 бар.

Литература

1. Hill G. C. et al. SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2007. – Т. 138. – №. 1. – С. 52-62.
2. Zhu Y., Wang A. Miniature fiber-optic pressure sensor // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2005. – Т. 17. – №. 2. – С. 447-449.

КОГЕРЕНТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЧАСТОТНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С САМОСКАНИРОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Ткаченко А. Ю., Смолянинов Н. Н., Скворцов М. И., Лобач И. А., Каблуков С. И.
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

COHERENT OPTICAL FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETER BASED ON A FIBER LASER WITH SELF-SWEEPING FREQUENCY FOR SENSORY APPLICATIONS

Tkachenko A. Yu., Smolyaninov N.N., Skvortsov M.I., Lobach I.A., Kablukov S.I.

Аннотация

Представлены первые результаты, демонстрирующие возможность применения когерентного оптического частотного рефлектометра на основе волоконного лазера с самосканированием частоты для сенсорики. В качестве сенсорной линии был использован массив различных волоконных брэгговских решеток (ВБР). Было показано, что в разработанном рефлектометре могут быть использованы ВБР со спектром отражения, лежащим вне области сканирования нашего источника. Техника частотной рефлектометрии также позволяет осуществлять пространственное разделение ВБР-датчиков, даже в случае одинаковых длин волн отражения. Экспериментально продемонстрирована возможность измерения температуры.

Оптическая рефлектометрия является ключевой технологией для распределенного измерения физических величин вдоль оптических линий. Для этого используются зависимости параметров излучения (например, поляризации, интенсивности или оптической частоты), рассеянного в оптическом волокне, от внешних физических воздействий (температуры или механической деформации) [1]. По принципу работы разделяют временную и частотную рефлектометрию. Принцип работы когерентной оптической рефлектометрии в частотной области (для краткости – оптическая частотная рефлектометрия) основан на спектральном анализе интерференционного сигнала, возникающего при смещении зондирующего и рассеянного излучений. Данный анализ может осуществляться при перестройке оптической частоты непрерывного зондирующего излучения. В этом случае пространственная координата отражателей, расположенных вдоль исследуемой линии, пропорциональна частотной координате максимумов Фурье-спектра от измеренного в процессе перестройки оптической частоты интерференционного сигнала.

В качестве основного элемента когерентного оптического частотного рефлектометра предлагается использовать волоконный лазер с самосканированием частоты. В лазерах такого типа оптическая перестройка частоты происходит за счет внутренних процессов, происходящих в активном волокне, без использования каких-либо перестраиваемых элементов. Важной особенностью лазера является генерация последовательности микросекундных когерентных импульсов со спектральной шириной не более 1 МГц и строгой дискретностью оптической частоты. Диапазон перестройки лазера составляет 1060-1080 нм. В [2] была показана возможность достижения пространственной дискретизации ~200 мкм и чувствительности по коэффициенту отражения приблизительно до -85 дБ/мм при длине тестовой линии ~9 м.

Оптическая схема рефлектометра реализована на основе интерферометра Маха-Цендера, образованного тремя ответвителями. Одно из плеч интерферометра содержит сенсорную линию, состоящую из массива 28 ВБР с пиком отражения вблизи 1092 нм и

одной ВБР с пиком отражения вблизи 1064 нм попадает в область перестройки самосканирующего лазера в отличие от всех остальных ВБР. По этой причине далее будем разделять ВБР на резонансную (на 1064 нм) и нерезонансные (на 1092 нм).

Благодаря линейной связи оптической частоты и номера импульса можно получить спектральную зависимость нормированной амплитуды сигнала интерференции, основываясь на относительном номере импульса. Рефлектограмма, т.е. продольное распределение отраженного сигнала вдоль волоконной линии, получалась в результате применения быстрого преобразования Фурье к зависимости нормированного сигнала интерференции от оптической частоты (номера импульса). На рис. 1а видно, что рефлектограмма состоит из множества пиков, при этом каждый соответствует отдельной ВБР. Видно, что амплитуда сигнала отражения резонансной ВБР выше, чем у нерезонансных.

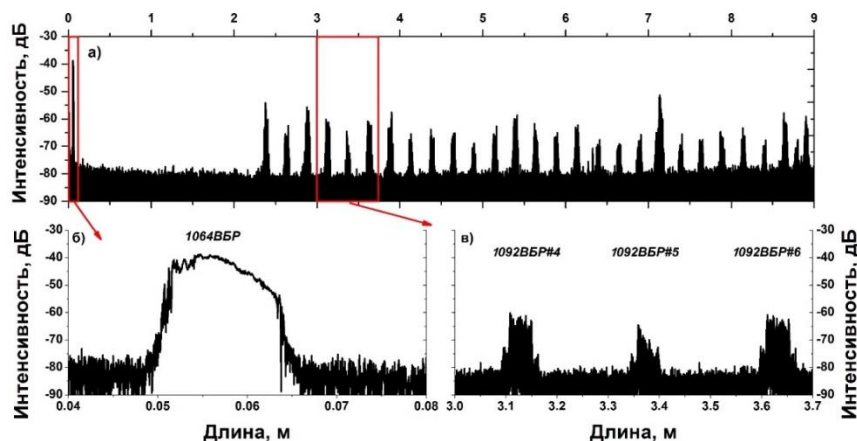


Рисунок 1. Рефлектограмма сенсорной линии в разных масштабах.

Для демонстрации сенсорных задач одна из нерезонансных ВБР помещалась в термостат, позволяющий производить нагрев от комнатной температуры до 100°C. В экспериментах анализировалась корреляционная функция спектров отражения ВБР при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии. Для исключения влияния случайного начала сканирования лазера проводился учет сдвига по корреляционному пику реперной ВБР, находящейся при комнатной температуре.

Для каждой температуры (25, 50, 75, 100°C) измерялись две реализации спектров. Рис. 2 показывает смещение корреляционного узкого пика в область меньших частот при нагреве нерезонансной ВБР. Величина смещения корреляционного пика линейно связана с температурой с наклоном 1.83 ГГц/°C (0.73 нм/100°C), что близко к чувствительности стандартной ВБР в области 1 мкм.

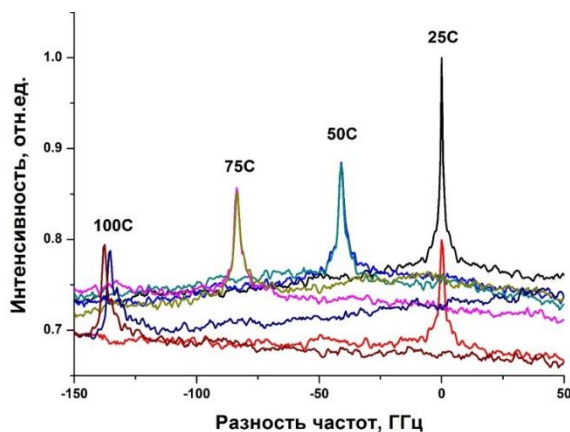


Рисунок 2. Функции корреляции между спектрами отражения нерезонансной в.б.р. при комнатной температуре (25°C) и в нагретом состоянии с учетом компенсации сдвига частоты по дополнительной реперной решетке, расположенной при комнатной температуре.

Финансирование:

Работа выполнена в рамках темы гос. задания (№ гос. рег. AAAA-A19-119112990054-4).

Литература

1. Hartog A.H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors - CRC Press (2018).
2. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И. Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты - Квантовая электроника, 49(12), 2019. – с.1121-1126.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ ТЕЙПЕРОВ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКАХ И ЛАЗЕРАХ

¹Кузнецов П.И., ^{1,2}Судас Д.П., ¹Савельев Е. А.

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург

CREATION OF FIBER TAPERS BY CHEMICAL ETCHING FOR APPLICATION IN FIBER SENSORS AND LASERS

Kuznetsov P.I., Sudas D.P., Saveliev E.A.

Аннотация

На основе волокна SMF-28 методом безопасного химического травления изготовлена серия утонённых волокон (тейперов). С помощью частотного рефлектометра определено местоположение возникающих потерь в них. При осаждении на утонённую часть волокна тонких плёнок ZnTe наблюдались LMR-резонансы. Они исследованы в качестве датчиков показателя преломления, их чувствительность составила более чем 5000 нм на единицу показателя преломления (RIU). Изготовлены также кольцевые импульсные волоконные эрбиевые лазеры с пассивными модуляторами добротности на основе тейперов с диаметром менее 10 мкм, покрытых смесью полимер-нанопорошок (Bi_2Se_3 , MoSe_2 , NiO).

Одними из самых перспективных элементов, изготавливаемых на основе пассивных оптических световодов, являются волоконные тейперы. Их использование позволяет изготавливать пассивные модуляторы добротности для импульсных волоконных лазеров [1] и датчики для контроля различных характеристик окружающей среды [2, 3]. Существует два основных метода изготовления волоконных тейперов: термическая перетяжка волокна и метод химического травления. В первом варианте сохраняются пропорции сердцевина-оболочка волокна, однако нарушается геометрия световедущей сердцевины. Использование метода химического травления позволяет сохранить диаметр сердцевины, проще в реализации и не требует специального дорогостоящего оборудования. В данной работе демонстрируется способ приготовления волоконных тейперов методом безопасного химического травления оптического волокна SMF-28 с целью последующего их использования для изготовления сенсоров и пассивных модуляторов добротности.

Существует два подхода к изготовлению тейперов методом химического травления. В первом подходе используется раствор плавиковой кислоты, являющейся высокотоксичным веществом. Второй подход, который применяется в данной работе,

связан с использованием малотоксичного раствора $\text{NH}_4\text{F}-(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$. Волокно с предварительно очищенным от защитного полимерного покрытия участком, закреплялось на гидрофобной планке и заливалось лужицей раствора диаметром около 20 мм. Один край планки фиксировался штифтом на стационарном основании, а другой располагался на эксцентрикe, закрепленном на оси мотора. За счет изменения знака наклона планки происходит смещение лужицы раствора на расстояния ± 2 мм. Это позволило изготавливать утонённые волокна, обладающие плавными изменениями диаметра конусов.

После завершения травления измерялся диаметр тейпера и его спектр пропускания в диапазоне длин волн 1150-1650 нм. Затем выполнялись измерения на рефлектометре в диапазоне длин волн 1530-1570 нм. Это позволило нам определить с точностью 10 мкм положение, а также величину потерь в тейпированном волокне. Было обнаружено, что при диаметре тейпера < 8.2 мкм происходит резкий рост оптических потерь в нём, что связано с полным стравливанием светоотражающей SiO_2 оболочки волокна SMF-28.

Тейпера с диаметрами перетяжки от 16 до 30 мкм использовались нами в качестве основы для изготовления сенсоров, работающих на основе явления резонанса затухающей моды (lossy mode resonance - LMR). Для этого на утоненную поверхность волокна методом MOCVD наносилась тонкая пленка ZnTe. Для исследования чувствительности положения LMR к изменению показателя преломления окружающей среды была приготовлена серия водных растворов изопропилового спирта. Чувствительность рефрактометра составила 5100 нм/RIU (Рис. 1), что сопоставимо с рекордным результатом для LMR-сенсоров [3].

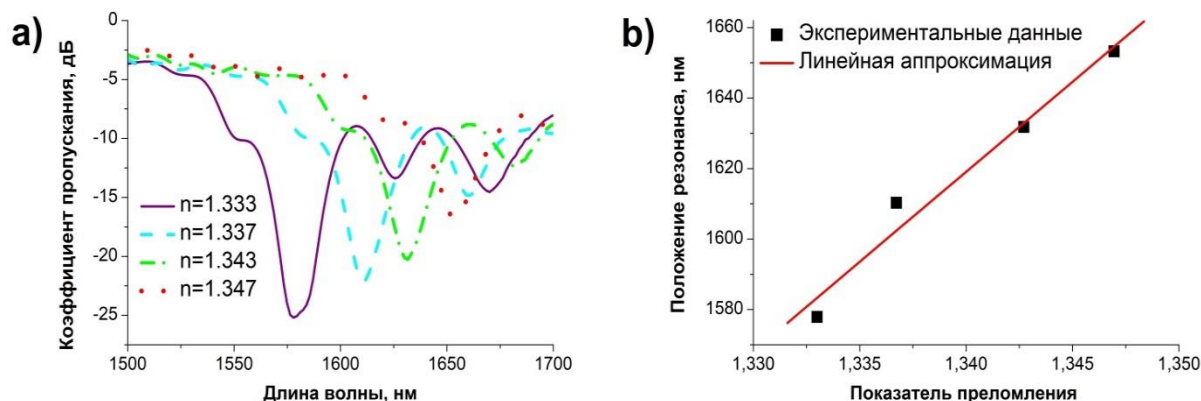


Рисунок 1. а) – Спектры пропускания тейпера в различных водных растворах изопропилового спирта; б) – Зависимость положения резонанса от показателя преломления окружающей среды для тейпера, покрытого плёнкой ZnTe толщиной 23 нм.

Тейперы с диаметром < 10 мкм использовались нами для изготовления пассивных модуляторов добротности волоконных эрбиевых лазеров. Для этого образцы покрывались смесью силикона и нанопорошка (MoSe_2 , NiO и Bi_2Se_3) в концентрациях, обеспечивающих значение коэффициента пропускания 10–60% на длине волны 1560 нм. Затем тейперы встраивались в схему кольцевого волоконного лазера, что позволяло перевести лазер из постоянного режима работы в импульсный режим. Частота следования импульсов составляла примерно 20 кГц при их длительности от 5 до 10 мкс при максимальной средней выходной мощности лазера.

Литература

1. Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. High-power fibre lasers - *Nature Photonics*, 7(11), 2013. - pp.861-867.
2. Rodríguez-Schwendtner E., González-Cano A., Díaz-Herrera N., Navarrete M.C., Esteban Ó. Signal processing in SPR fiber sensors: Some remarks and a new method - *Sensors and Actuators B: Chemical*, 268, 2018. – pp.150-156.

3. F. J. Arregui, I. D. Villar, C. R. Zamarrero, P. Zubiate, I. R. Matias. Giant sensitivity of optical fiber sensors by means of lossy moderesonance - *Sensors and Actuators B: Chemical*, 232, 2016. - pp.660-665.

ОСНОВЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДОСТУПА

¹Горлов Н.И., ²Богачков И.В.

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск;

²Омский государственный технический университет, г. Омск

BASES OF INFORMATION SECURITY OF PHYSICAL CHANNELS OF OPTICAL ACCESS NETWORKS

Gorlov N.I., Bogachkov I.V.

Аннотация

Рассматривается проблема защиты информации от несанкционированного доступа и представлены результаты сравнительного анализа методов извлечения информации из оптического волокна. Предложена методика обнаружения факта формирования каналов утечки информации, проводимого различными способами, для успешной борьбы с несанкционированным доступом. Из проанализированных способов формирования каналов утечки информации в волоконно-оптической линии связи наиболее простым является изгиб оптического волокна для нарушения условий полного внутреннего отражения. В этом случае в системе мониторинга для обнаружения изгибов волокон необходимо отслеживать внесенные потери.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в начале развития считались неуязвимыми к несанкционированному доступу, что обуславливалось физическими принципами распространения электромагнитной волны в световоде. Однако, со временем была исследована и доказана принципиальная возможность физического съема информации с оптического волокна. Впоследствии общественности стали известны факты обнаружения подслушивающих устройств на ВОЛС европейских телекоммуникационных компаний. Очевидным стал факт, что ВОЛС лишь изначально имеют более высокую степень защиты информации от физического съема, чем другие типы линий связи.

Во-первых, это связано с тем, что, электромагнитное излучение без внешнего воздействия выходит за пределы оптического волокна на расстояние не более длины волны. Так создается обязательное условие для съема информации - физический контакт [1]. Во-вторых, оптические кабели имеют сложную конструкцию с множеством волокон с упрочняющими и защитными элементами (в отдельных случаях металлической броней). Также существуют специальные кабели, оснащаемые дополнительными защитными механизмами (например, газовой оболочкой или электромагнитным полем). В результате физический доступ к отдельному волокну становится сложным и трудоемким процессом. В-третьих, оптические каналы характеризуются высокой скоростью передачи информации (сотни Гбит/с), что достигается использованием коротких световых импульсов (десятки и сотни пикосекунд). Это формирует повышенные требования к характеристикам аппаратуры детектирования [2].

Несмотря на технологическую сложность, процесс несанкционированного подключения к ВОЛС возможен. В настоящее время хорошо известны следующие способы съема информации из оптического волокна: изгиб, скручивание, сжатие, растяжение,

сравливание оболочек, вплавление, возбуждение мод, подключение направленного оптического ответвителя и воздействие высокочастотным или акустическим полем.

Способ несанкционированного съема информации посредством сгибания основывается на физическом принципе распространения оптической волны из-за внутреннего отражения оптической волны. Для достижения полного внутреннего отражения угол падения сигнала оптической волны на переходе между сердцевиной и оболочкой должен быть больше, чем критический. Изгиб оптического волокна должен быть таким, чтобы угол отражения стал меньше критического. При этом оптическая волна станет проходить сквозь оболочку оптического волокна [3].

Обнаружение несанкционированного подключения при использовании нарушителем способов первой группы затруднено, поскольку параметры излучения практически не меняются. При этом мощность бокового излучения достаточно мала, что ухудшает достоверность приема перехваченных оптических волн, что вынуждает непосредственно использовать участки ВОЛС с высоким уровнем излучения. Высокие уровни излучения находятся на участках соединения оптической линии, местах изгиба оптического кабеля и участки со значительным давлением грунта. Следует отметить, что чем больше вводимая мощность, тем сильнее будут изменяться параметры канала передачи данных и, следовательно, легче обнаружить несанкционированное подключение.

В способах, использующих для вывода накладные ответвители, регулировка отводимой мощности затруднена. Способы третьей группы связаны со значительными техническими трудностями при их реализации. Значительные технические трудности при их реализации связаны с выводом излучения оптической волны и её обратным вводом представляют сложную техническую задачу. Они имеют высокую скрытность.

Системы мониторинга ВОЛС на базе оптического рефлектометра являются весьма эффективными для обнаружения несанкционированного подключения. Они позволяют осуществлять непосредственный мониторинг любой ветви в оптической сети доступа [4].

Литература

1. Rejeb R, Leeson M.S and Green R.J. Fault and attack management in all optical networks //IEEE Commun. Mag., 2006, vol. 44, no. 11, pp. 79–86.
2. Everett B. Tapping into fiber optical cables //Network Security., 2007, vol. 207, no. 5, pp. 13–16.
3. Guo S., Zhao Z. and Zhang Q., Failure rate model for optical fiber cable in electric power communication network based on Weibull distribution function // Power System Protection and Control, 2017, vol. 45, no. 17, pp. 92-99.
4. Булавкин И.А. Сравнительный анализ методов диагностики пассивных оптических сетей доступа применительно к задачам обнаружения несанкционированных подключений// Т-Comm - Телекоммуникации и транспорт. –2008. - №3. –С. 20-22.

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Бочкова С.Д., Волковский С.А., Ефимов М.Е., Дейнека И.Г., Смирнов Д.С.,
Литвинов Е.В.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт - Петербург

THE METHOD OF FINDING THE AREA OF AN IMPACT IN COMPOSITE MATERIAL USING FIBER OPTICAL SENSORS OF ACOUSTIC EMISSION

Bochkova S.D. , Volkovsky S.A., Efimov M.E., Deineka I.G. , Smirnov D.S., Litvinov E.V.

Аннотация

Описан метод определения положения источника акустического воздействия в композитных материалах с использованием волоконно-оптических интерферометров Фабри–Перо. Предложенный метод основан на анализе времени прихода акустических сигналов на чувствительные элементы при механическом воздействии на композитный материал. Произведено моделирование относительных времен прихода сигналов на чувствительные элементы в зависимости от местоположения источника воздействия, а также калибровка метода путем нахождения оптимальных пороговых значений для корректной регистрации времени прихода акустического сигнала. Описана экспериментальная установка и указаны условия проведения эксперимента. Разработанный метод локализации был реализован в экспериментальном макете регистратора сигналов акустической эмиссии и исследован в эксперименте. Рассмотрены направления дальнейших исследований и пути модернизации предложенного метода.

На основе теоретического исследования методов локализации воздействия (ТОА, АІС и модифицированной версия АІС) появилась идея создания более точного и надежного метода для композитных материалов, где в качестве чувствительных элементов используются волоконные интерферометры Фабри–Перо. Данный выбор обусловлен широким распространением композитных материалов во многих отраслях. Было принято решение использовать оригинальный метода опроса волоконно-оптических интерферометров Фабри–Перо, который заключается в гомодинировании несущей с помощью фазовой модуляции обеспечив достоверность значений амплитуды выходного сигнала вне зависимости от положения рабочей точки интерферометра. В качестве среды распространения акустической волны использовалась композитная пластина (рис. 1).

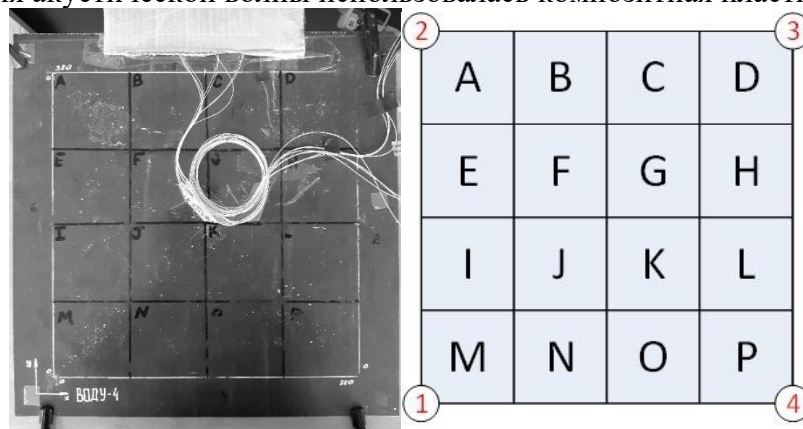


Рисунок 1. Внешний вид экспериментальной установки.

В углы композитной пластины были встроены четыре интерферометра Фабри–Перо, опрос которых проводился экспериментальным макетом регистратора сигналов а.э., позволив регистрировать акустические сигналы с соотношением сигнал/шум более 30 дБ, обеспечивая высокую достоверность выходных данных. Данные с датчиков, передавались на персональный компьютер, где происходила дальнейшая обработка и калибровка метода определения местоположения с помощью MatLab. Используемый метод заключается в сравнении разности времени прихода сигналов с датчиков. Разработанный метод включает в себя расчет длительности и энергии акустического импульса. Моделирование проводилось на основе акустических сигналов, полученных с экспериментальной установки, а калибровка находилась оптимальных значений порогов и относительных времен прихода акустических сигналов в зависимости от местоположения источника. Записанные сигналы были использованы в качестве входных данных для разработанной модели.

С помощью анализа набора повторяемых данных были определены приблизительные скорости распространения и найдены оптимальные значения пороговых значений по амплитуде регистрируемого сигнала. Разработанный метод, а также расчеты длительности и энергии каждого импульса были имплементированы в п.л.и.с. Собранный экспериментальный макет в совокупности с программным обеспечением, разработанным по предложенному методу, был экспериментально исследован. В качестве источника акустического воздействия использовался тот же стальной шарик. Падение шарика с высоты на чувствительную плоскость пластины порождало упругие колебания регистрируемые с помощью встроенных в нее в.о. интерферометров, сигналы с которых демодулировались с помощью макета-регистратора сигналов а.э., в котором также проводился расчет местоположения источника акустического воздействия, энергии и длительности. После окончания расчетов, результат выводился на экран. С целью повышения повторяемости входных данных источник акустического воздействия был одинаковым для каждой тестируемой точки. Для оценки достоверности вычисления длительности и энергии, падение шарика осуществлялось с трех высот: 1, 1.2 и 1.5 м.

Представленный метод основан на сравнении двух боковых расстояний относительно опорного датчика. Реализована его модель алгоритма в среде MatLab. В результате калибровки и моделирования были подобраны оптимальные пороговые значения и найдены относительные времена прихода акустических сигналов в зависимости от местоположения источника. Проведено экспериментальное исследование предложенного метода посредством его реализации в составе экспериментального макета регистратора сигналов а.э. в виде части проекта в п.л.и.с. В результате была установлена усредненная абсолютная погрешность предложенного метода. Она составляет порядка 15 мм.

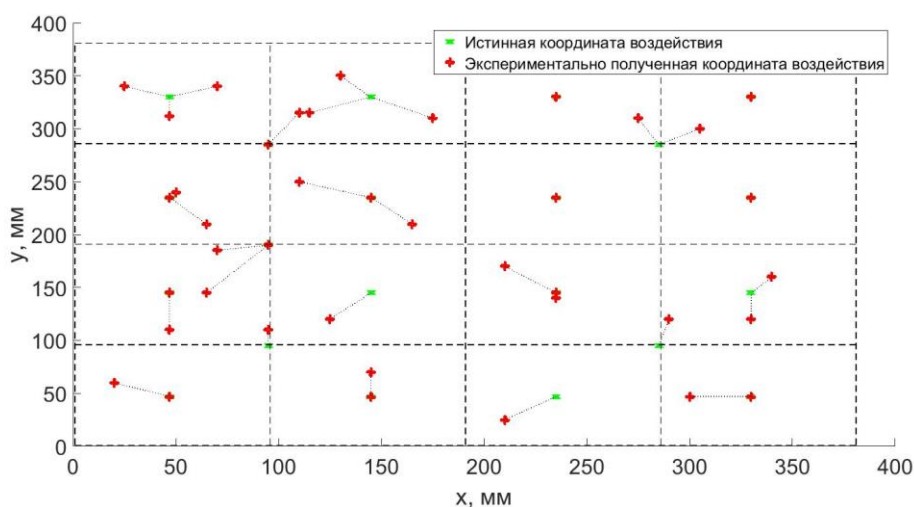


Рисунок 2. Вычисленные и реальные местоположения источника а.э.

В дальнейшем планируется повышение точности локализации посредством модификации существующего метода. Модифицировать метод предполагается введением дополнительных математических выражений, в частности алгоритмами авто- и кросс-корреляции для более точного нахождения моментов прихода акустического сигнала на чувствительные элементы. Предложенный метод может быть использован для решения задач, в которых требуется постоянный мониторинг композитных материалов. К таким задачам можно отнести детектирование, оценку и локализацию повреждений в процессе эксплуатации лопастей вертолета, крыльев самолета, мостов и других объектов.

Литература

1. Grosse C.U., Ohtsu M. // *Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering*. 2008. P. 1–404. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>
2. El Kouche A., Hassanein H.S. // *Procedia Computer Science*. 2012. V. 10. P. 136.
3. Gorman M.R. // *J. the Acoustical Society of America*. 1991. V. 90. P. 358.
4. Al-Jumaili S.Kh., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin Rh. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. V. 72. P. 513. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.11.026>.
5. Akaike H. // *Ann. Inst. of Stat. Math.* 1974. V. 26. P.363–387.
6. Pratik Shrestha, Yurim Park, Hyunseok Kwon, ChunGon Kim // *Composite Structures*. 2017. V. 180. P. 412. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.094>.
7. Cairns D.S., Wood L.A // *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 1999. С. 27.
8. Ефимов М.Е. Автореф. дис. канд. техн. наук. 05.11.01. ИТМО, Санкт-Петербург, 2018. 140 с.
9. Куликов А.В., Мешковский И.К., Ефимов М.Е. Патент на изобретение RU 2624837 // *Опубл.* 07.07.2017. Бюл. № 19.

РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ МАЛОЙ ДЛИНЫ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

¹Горшков Б. Г., ²Горшков Г. Б., ²Жуков К. М.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

²ООО «Лаборатория электронных и оптических систем», г. Москва

REFLECTOMETER FOR MEASURING LOSSES IN SMALL-LENGTH OPTICAL FIBERS BASED ON REGISTRATION OF LOW-FREQUENCY RAMAN SCATTERING

Gorshkov B. G., Gorshkov G. B., Zhukov K. M.

Аннотация

В работе экспериментально исследована схема рефлектометра для измерения затухания излучения в оптических волокнах, использующего низкочастотные (бозонные) пики комбинационного (рамановского) рассеяния света (КР). За счет исключения интерференционных явлений, связанных с использованием рэлеевского рассеяния, достигнута высокая точность измерения затухания на коротких отрезках волокна – от 50 м до 1000 м. Продemonстрировано уменьшение шумов более чем в 30 раз. При этом измерения происходят полностью в С-диапазоне длин волн. Недостаток схемы связан с температурной зависимостью интенсивности КР. Предложен способ температурной компенсации связанной с этим погрешности за счет дополнительного получения

рефлектограммы на длине волны антистоксовой компоненты КР, имеющей сильную зависимость интенсивности от температуры.

Имеется практически важная задача измерения затухания излучения на единицу длины оптического волокна для коротких отрезков (от десятков до сотен метров) с достаточной точностью (до сотых долей дБ/км), и она представляется весьма актуальной. Измерение потерь на коротких участках оптических волокон обычным рэлеевским рефлектометром [1] проблематично из-за шумоподобных рефлектограмм [2], причем уровень этих «шумов», не устранимых накоплением сигналов, тем больше, чем уже спектр источника излучения.

Нами впервые предложено получать для анализа потерь рефлектограммы на частотах бозонных пиков [3] комбинационного рассеяния КР (рис. 1, 2) при максимальном подавлении упругого рассеяния. С этой целью в схеме рефлектометра [4] перед фотоприемником помещаются фильтры, выделяющие только интересующий нас участок спектра 1520-1580 нм. (рис. 1). Полученные рефлектограммы для отрезка волокна длиной 1 км приведены на рис.2.

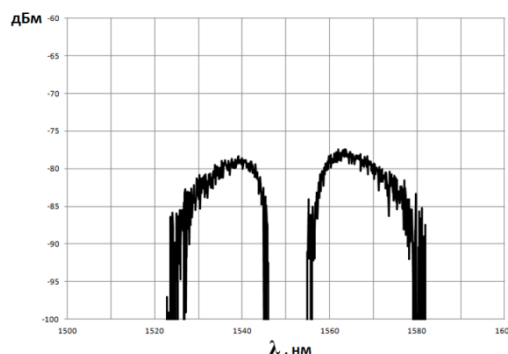


Рисунок 1. Спектр бозонного рассеяния на входе в фотоприемник.

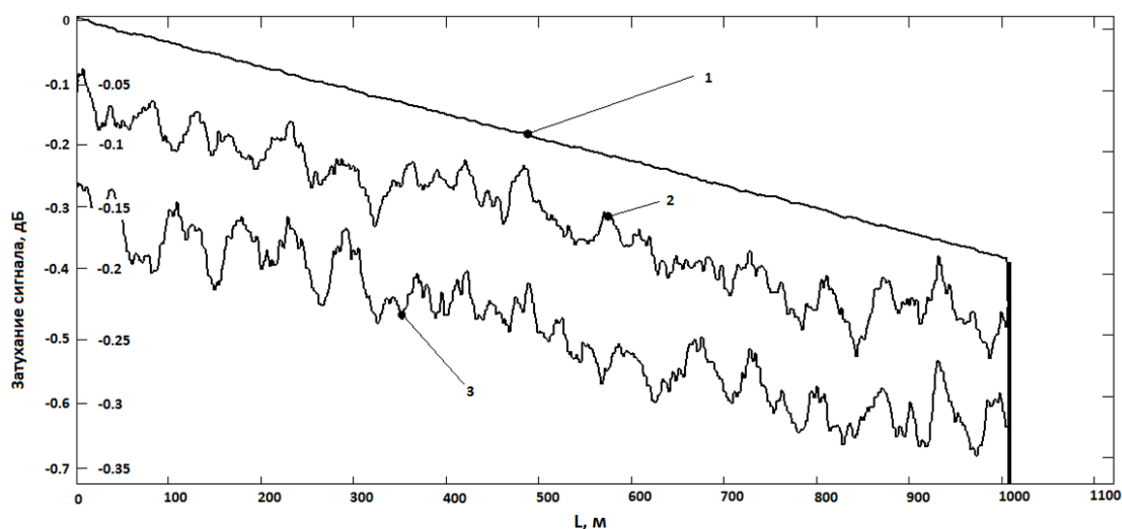


Рисунок 2. Рефлектограмма для отрезка оптического волокна Fujikura Future Guide LWP.

Кривая 1 соответствует обратному рассеянному излучению, содержащему бозонные пики КР, кривые 2 и 3 – замеры рефлектометра ANDO AQ7275, со скремблированием и без, соответственно.

Уровень зашумленности рефлектограммы (рис. 2, кривая 1) по сравнению с рэлеевским рефлектометром крайне низкий, среднеквадратичное отклонение шума (СКО) составляет $5 \cdot 10^{-4}$ дБ, или 0,01 %.

Плюсы такой схемы:

- 1) высокая точность: уже при длине волокна 50 м ошибка измерений не превышает 0,002 дБ/км;
- 2) измерения происходят полностью в С-диапазоне длин волн;
- 3) поскольку рэлеевская компонента подавляется фильтром, установленным перед фотоприемником, ослабляется и отраженное зондирующее излучение, следовательно, существенно уменьшается сигнал от неоднородностей, в частности, от коннекторов (френелевское отражение) и некачественных сварок.

Минус такой схемы заключается в том, что в отличие от рэлеевского рассеяния, интенсивность спонтанного КР на оптических фонах зависит от температуры. Измерения желательно проводить при постоянной температуре по длине исследуемого волокна.

Предложен способ температурной компенсации связанной с этим погрешности за счет дополнительного получения рефлектограммы на длине волны антистоксовой компоненты КР, имеющей сильную зависимость интенсивности от температуры.

Литература

1. Personick S. D., *The Bell System Technical Journal*, 56, 355 (1977).
2. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Гринштейн М.Л., Таранов М.А. *Квантовая электроника*, 47, 83 (2017).
3. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. *Квантовая электроника*, 17, 345 (1990).
4. Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М. *Квантовая электроника*, 49, 581 (2019).

РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ БОЗОННЫХ КОМПОНЕНТ РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

¹Горшков Б.Г., ²Горшков Г.Б., ³Жуков К.М.

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*

²*ООО «Лаборатория электронных и оптических систем», г. Москва*

REFLECTOMETRIC MEASUREMENT OF CRYOGENIC TEMPERATURES BY THE METHOD OF BOSONIC COMPONENTS OF THE RAMAN SCATTERING REGISTRATION IN AN OPTICAL FIBER

Gorshkov B. G., Gorshkov G. B., Zhukov K. M.

Аннотация

Экспериментально показана возможность создания распределенного волоконно-оптического датчика, позволяющего проводить измерение криогенных температур вплоть до точки кипения жидкого азота. Принцип действия датчика основан на регистрации интенсивности бозонных пиков комбинационного (рамановского) рассеяния света в материале оптического волокна, отстоящих от частоты зондирующего излучения на 1 – 3 ТГц. Длина волны зондирующего излучения – 1,55 мкм, пространственное разрешение – 4 м, постоянная времени – 60 с. Эксперименты проводились в диапазоне температур 75,6 – 79,6 К, при этом получено разрешение по температуре 0,5 К.

В настоящее время перед волоконно-оптическими распределенными датчиками температуры стоит практическая задача измерения криогенных температур. Существуют несколько методов измерения температуры, среди них наиболее известны основанные на

измерении интенсивности рамановского рассеяния света [1], частотного сдвига бриллюэновского рассеяния, [2, 3], сдвига спектров [4, 5] и восстановления набегу фазы рэлеевского рассеяния [6]. Все методы, за исключением регистрации рамановского рассеяния, сложны в реализации. Традиционный метод измерения температуры путем регистрации стоксовой и антистоксовой компонент КР имеет ограничения при низких температурах. Антистоксова компонента в таких условиях имеет низкую интенсивность, в то время как стоксова, при существенно большей интенсивности не чувствительна к температуре. Предлагается способ решения данной задачи путем регистрации зависящей от температуры интенсивности бозонных пиков КР, которые к тому же имеют более высокую спектральную яркость, достаточную для их регистрации при криогенных температурах.

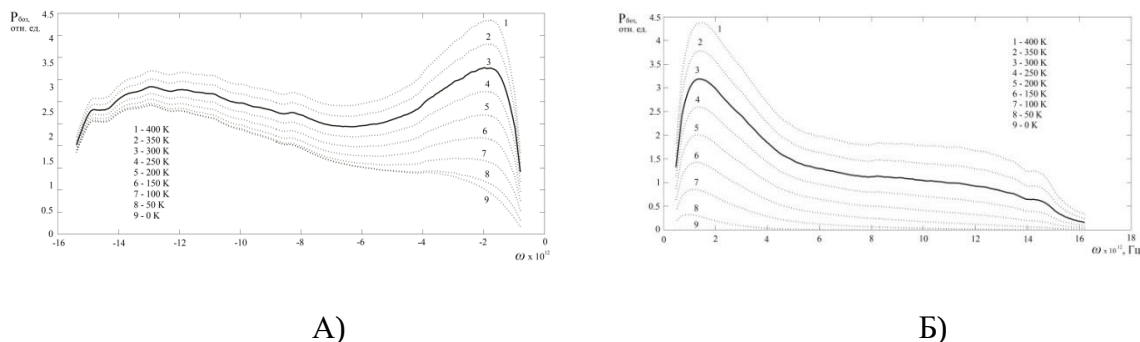


Рисунок 1. А) Спектр стоксовой компоненты КР. Сдвиг $\omega = 0$ соответствует зондирующему излучению с длиной волны 1551 нм.; Б) Спектр антистоксовой компоненты КР.

На рис. 1 приведены спектры мощности рамановского рассеяния в зависимости от частотного сдвига относительно центральной частоты зондирующего излучения в волокне SMF-28. Кривые, показанные сплошными линиями, соответствуют экспериментальным спектрам, полученным при температуре 300 К. Пунктирной линией показаны спектры, полученные в результате моделирования зависимости спектров КР от температуры в диапазоне 0-400 К с шагом 50°.

Для эксперимента была собрана рефлектометрическая установка, подобная описанной в [7], позволяющая регистрировать рассеянное излучение в диапазонах частот - 4..-1 ТГц и 1..4 ТГц, соответствующих бозонным пикам. Зондирующее излучение на длине волны 1551 нм вводилось в исследуемое волокно, состоящее из участка длиной 8 км LWP Fujikura и участка волокна длиной 18 м с полиимидным покрытием толщиной 15 мкм. Бухта последнего помещалась в емкость с жидким азотом. Путем изменения давления в емкости достигалось изменение температуры жидкого азота, приводящее к изменению интенсивности бозонной компоненты КР. Результаты эксперимента показаны на рис. 2.

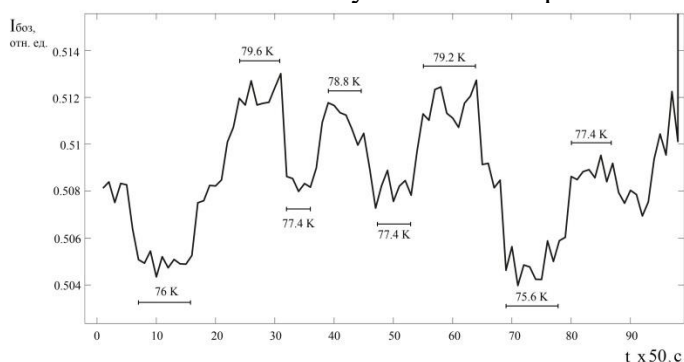


Рисунок 2. Временной ход эксперимента.

Таким образом, в работе экспериментально показана возможность создания простого распределенного волоконно-оптического датчика для измерения криогенных

температур, в частности, температуры жидкого азота, с пространственным разрешением 4 м, при времени накопления сигнала 50 с и чувствительностью по температуре 0,5 К.

Литература

1. Dakin J.P. Патент Великобритании GB2140554A (1984).
2. Горбатов И.Е., Горшков Б.Г. ФТТ, 30, 2226 (1988).
3. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. Квантовая электроника, 17, 345 (1990) [Sov. J. Quantum Electron., 20, 283 (1990)].
4. Gorshkov B.G., Taranov M.A., Alekseev A.E. Laser Phys., 27, 085105 (2017).
5. Lu, X., Soto, M. A., & Thévenaz, L. SPIE Vol. 9157, 91573R (2014).
6. Nikitin, S. P., Kuzmenkov, A. I., Gorbulyan, V. V., Nanii, O. E., Treshchikov, V. N. Laser Physics Vol. 28, 085107 (2018).
7. Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М. Квантовая электроника, 49, 581 (2019).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НА БРИЛЛЮЭНОВСКИЕ РЕФЛЕКТОГРАММЫ

¹Богачков И. В., ²Горлов Н.И.

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DIFFERENT KINDS OF OPTICAL FIBERS BENDING INFLUENCE ON BRILLOUIN REFLECTOGRAMS

Bogachkov I.V., Gorlov N.I.

Аннотация

Рассмотрены вопросы оценки влияния изгибов одномодовых оптических волокон различных видов на бриллюэновские рефлектограммы. Приведены результаты исследований результатов измерений для одномодовых оптических волокон разных видов.

Появление изгибов оптических волокон (ОВ) может влиять на характеристики рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ), и желательно оценить это влияние на бриллюэновские рефлектограммы. При изгибе ОВ из-за выхода части излучения из ОВ на границе раздела «сердцевина-оболочка» появляются возможности реализации локального несанкционированного доступа (НСД) [1 – 3]. Изгиб вносит оптические потери в ОВ, увеличивающиеся с кривизной ОВ, при этом в нём деформируется оптическая мода, смещающаяся от оси волокна. Изгиб вызывает деформацию в поперечном сечении волокна так, что ОВ испытывает сжатия на одной стороне ОВ (к центру изгиба), в то время как другая сторона подвергается растяжению [1, 4]. В изогнутом ОВ смещение оптического луча, вызванного кривизной, в сочетании с распределением натяжения, вызванным изгибом, приводит к изменению бриллюэновского сдвига частоты (БСЧ – f_B), что утверждается в [4]. Так как БСЧ изменяется при изменении температуры и/или при изменении продольного натяжения ОВ, проявляется трудность определения изгиба ОВ по смещению пика спектра РМБ на бриллюэновских (БОИР) рефлектограммах. Однако изгиб ОВ вносит дополнительные оптические потери в ОВ, увеличивающиеся с кривизной (уменьшением радиуса изгиба) ОВ, что может быть обнаружено на бриллюэновских рефлектограммах [1 – 3], а при малом радиусе изгиба – и обычным оптическим импульсным рефлектометром. В месте изгиба ОВ оптическая мода деформируется. Изгиб ОВ вызывает натяжение в поперечном сечении ОВ. В изогнутом ОВ смещение, вызванное кривизной

оптического пучка, в сочетании с распределением натяжения, вызванным самим изгибом, приводит к изменению БСЧ. Боковое смещение оптического поля (d) из-за изгиба ОВ определяется следующей формулой [4]:

$$d = \frac{a^2 V^2}{4\Delta R} (0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6})^4, \quad (1)$$

где a – радиус сердечника ОВ, $V = 2\pi n_1 \sqrt{\Delta} (a / \lambda_L)$ – нормированная частота, $\Delta = 1 - (n_2 / n_1)^2$, n_1 – показатель преломления сердцевин ОВ, n_2 – показатель преломления оболочки ОВ [4].

По результатам моделирования видно, что с уменьшением радиуса кривизны ОВ распределение оптического поля смещается от центра кривизны оси ОВ.

Относительное растяжение ОВ, вызванное изгибом радиусом R , задается выражением:

$$\varepsilon_E = y / R, \quad (2)$$

где y – расстояние от оси ОВ, взятое вдоль направления изгиба [4].

Распределение оптического поля при изгибе смещается от центра кривизны оси ОВ при уменьшении радиуса изгиба [4]. Считается, что изгиб вводит позиционно-зависимое натяжение участка ОВ. Очевидно, что в месте изгиба должно изменяться натяжение ОВ для большего (внешнего) и меньшего (внутреннего) радиусов ОВ по изгибу (относительно оси ОВ в месте изгиба) (2), а значит, и величины БСЧ [1, 4]. Анализ показал, что изгиб радиусом в несколько сантиметров приводит к весьма незначительному изменению БСЧ. Натяжение при изгибе отличается от осевого (продольного – из-за удлинения-сжатия вдоль оси ОВ), и получается значительно меньше оценки натяжения по формуле (2).

На рис. 1 показан график изменения натяжения и БСЧ при сравнительно больших радиусах изгиба (характерных для НСД), которые были исследованы в экспериментах.

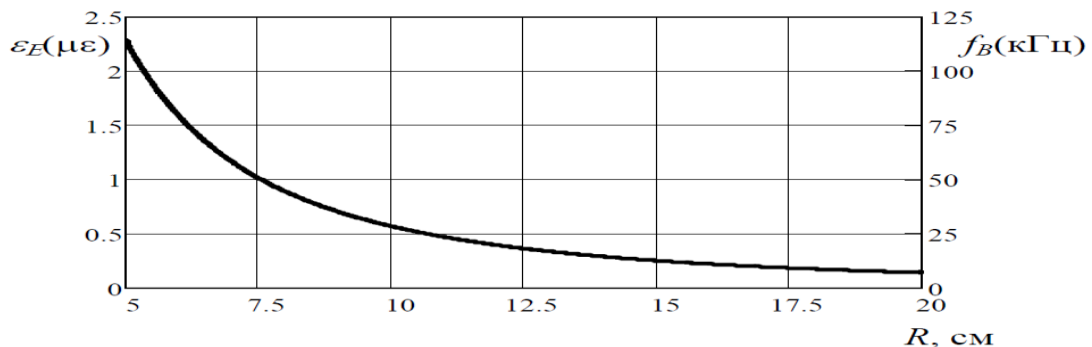


Рисунок 1. График зависимостей внесённого натяжения и БСЧ от радиуса изгиба

Очевидно, что при таких изгибах, характерных для «малозаметных» способов НСД, изменения БСЧ, отмеченные в публикации [4], слишком малы. Изменение БСЧ, вызванное изгибом из-за совместного влияния смещения оптического пучка и растяжения, не превышает единиц МГц, и поскольку БОИР регистрирует «усреднённый» по сечению луч, эти изменения несут существенны, в отличие от изменения уровня сигнала РМБ.

На рис. 2 приведены графики внесённого затухания (A , дБ) в области изгиба в зависимости от диаметра полупетли для всех рассмотренных ОВ.

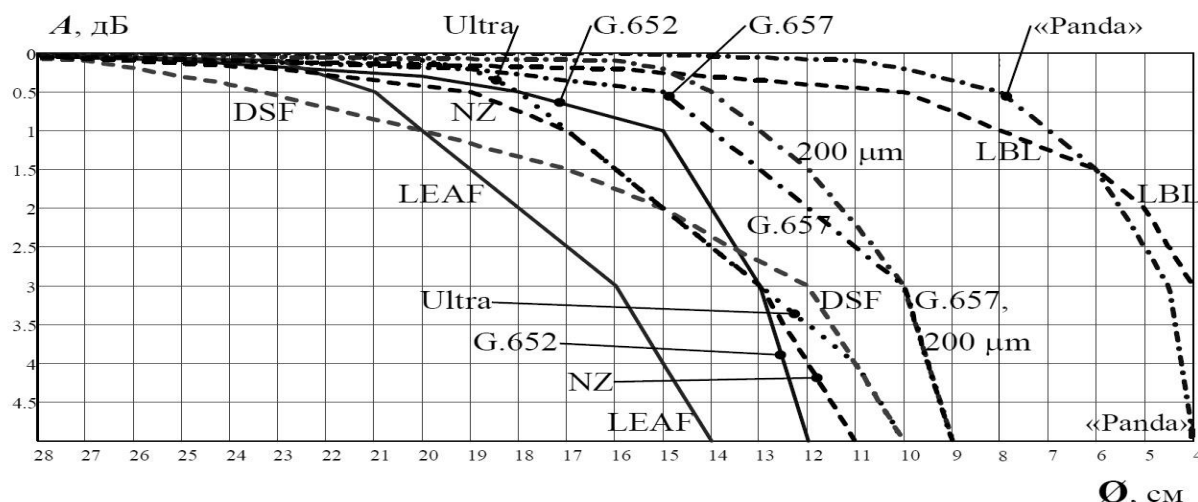


Рисунок 2. Графики внесённого затухания $A(\phi)$ в области изгиба.

БОИР-рефлектограмма показывает хорошую чувствительность к изгибам и микроизгибам. БОИР обнаруживает изгиб ОВ, и это происходит из-за резкого изменения уровня отраженного сигнала. У большинства ОВ изменения на БОИР-рефлектограммах начинают наблюдаться при диаметре изгиба в форме полупетли 20 – 25 мм, что может быть использовано в системе мониторинга ОВ ВОЛС для обнаружения НСД [1 – 3].

Литература

1. Bogachkov I. V. Researches of bend influences on Brillouin reflectograms of different types of optical fibers // T-comm. – 2019. – Vol. 13, N. 3. – P. 75–79.
2. Богачков И. В., Трухина А. И. Изучение влияния изгибов оптических волокон на бриллюэновские рефлектограммы // Всерос. конф. «Оптическая рефлектометрия– 2018». – Пермь, 2018. – С. 77–79.
3. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Gorlov N. I. Study of Bend Influences of Optical Fibers on Brillouin Reflectograms // 14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. – Novosibirsk, 2018. – Vol. 1, p. 2. – P. 140–144.
4. Minardo A., Bernini R., Zeni L. Bend-Induced Brillouin Frequency Shift Variation in a Single-Mode Fiber // IEEE Photonics Technology Lett. – 2013. – Vol. 25, N. 23. – P. 2362–2364.

ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ПО БРИЛЛЮЭНОВСКИМ МУЛЬТИ-РЕФЛЕКТОГРАММАМ

¹Богачков И. В., ²Горлов Н. И.

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

AN IDENTIFICATION OF INFLUENCE ON OPTICAL FIBERS FACTOR BY BRILLOUIN MULTI-REFLECTOGRAMS

Bogachkov I.V., Gorlov N.I.

Аннотация

Рассмотрены вопросы классификации факторов, вызывающих изменение натяжения оптических волокон, на основе анализа бриллюэновских мульти-рефлектограмм. Проанализированы различия бриллюэновских рефлектограмм натяжения

вдоль оптического световода при различных воздействиях. Представленные результаты позволяют выявлять фактор, который оказал преимущественное влияние на натяжение волокон.

Для выявления участков оптических волокон (ОВ) с повышенным натяжением и/или изменённой температурой применяют бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (БОИР) [1, 2].

Бриллюэновский сдвиг частоты (БСЧ – f_B) связан с характеристиками среды распространения следующей формулой:

$$f_B(E_\varepsilon, T) = 2 f_L v_{Aэфф}(E_\varepsilon, T) n_{эфф} / c = 2 v_{Aэфф}(E_\varepsilon, T) n_{эфф} / \lambda_L, \quad (1)$$

где $v_{Aэфф}(E_\varepsilon, T)$ – эффективная скорость гипер акустической волны, зависящая от температуры (T), продольного натяжения (E_ε) и структуры сердечника ОВ, $n_{эфф}$ – эффективный показатель преломления среды, f_L – частота излучающего лазера (λ_L – длина волны), c – скорость света в вакууме [1].

Связь БСЧ с изменениями E_ε и T определяется формулой:

$$f_B(E_\varepsilon, T) = f_{B0} + C_f^\varepsilon (E_\varepsilon - E_{\varepsilon 0}) + f_{BT} = f_{B0} + C_f^\varepsilon (E_\varepsilon - E_{\varepsilon 0}) + C_f^T (T - T_0), \quad (2)$$

где «0» индексы соответствуют нормальным условиям – комнатной температуре и отсутствию продольных растягивающих сил, C_f^ε и C_f^T – коэффициенты связи для соответствующих параметров ($f_B(E_\varepsilon)$, $f_B(T)$) [3], $f_{BT} = C_f^T (T - T_0)$ – смещение БСЧ относительно f_{B0} из-за изменения температуры [4].

После анализа характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) в ОВ определяется $f_B(E_\varepsilon, T)$ (БСЧ – значения максимумов спектра РМБ (СРМБ)) вдоль ОВ, что затем позволяет определить степень натяжения всех участков световода и обнаружить местоположение распределенных нерегулярностей в нём.

Хотя само появление продольного натяжения порядка 0.2% и выше уже является тревожным событием, которое требует дополнительного анализа, выявление смещения БСЧ, вызванного только температурными изменениями, позволяет выделить изменения натяжения, внесённые исключительно температурой, что даёт возможность получить график распределения натяжения в световоде, вызванные только продольными растягивающими нагрузками [4].

Для этого, кроме определения БСЧ (анализ СРМБ) и оценки его смещения относительно f_{B0} , необходимо также регистрировать распределение уровня обратно отражённого сигнала РМБ вдоль световода.

Экспериментальные исследования различных видов одномодовых ОВ в широком диапазоне температур позволили получить значение коэффициента зависимости интенсивности уровня обратно отражённого сигнала от температуры $+0.0145$ дБ/°С [1, 4], что соответствует $1.0033/^\circ\text{C}$. Согласно [3], $C_f^T = 0.0033/^\circ\text{C}$.

На рисунке 1 приведена мульти-рефлектограмма БОИР при нагреве отдельных участков световода до $+90^\circ\text{C}$, который был составлен из нескольких ОВ различных типов: G.652+LBL+LEAF+ULTRA (LBL и ULTRA – ОВ-G.652 “Corning”, а LEAF – ОВ-G.655 “Corning” с ненулевой смещённой дисперсией) [1, 4].

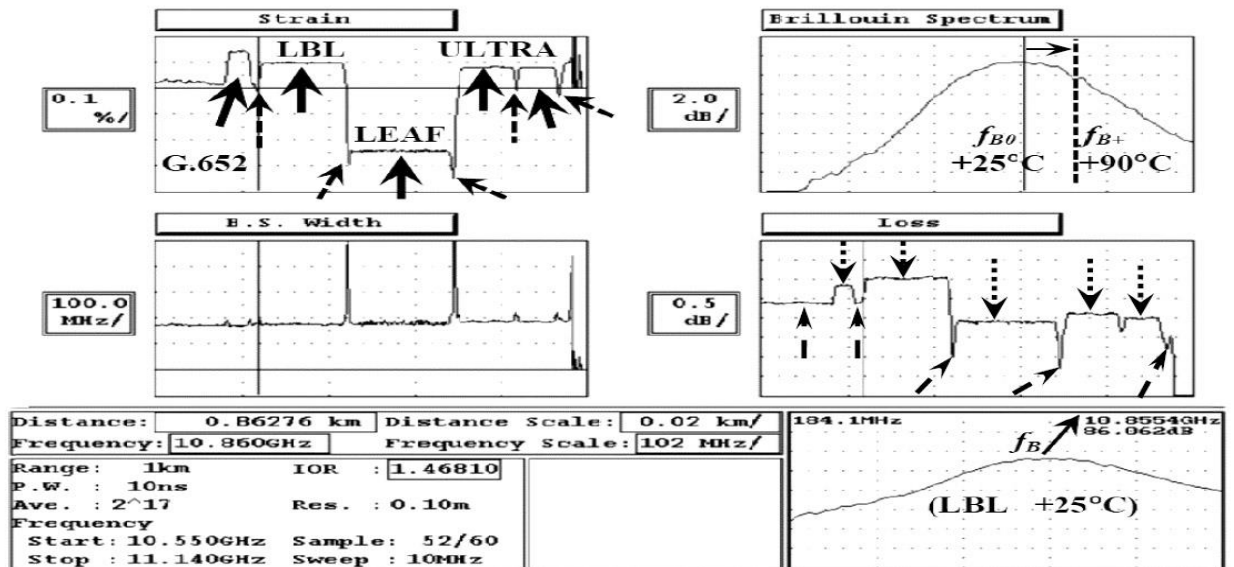


Рисунок 1. Мульти-рефлектограмма вдоль световода при нагреве участков до +90°C.

Кроме характерных изменений на графике натяжения (отмечены сплошными толстыми стрелками), на графике потерь наблюдается заметное увеличение интенсивности обратно отражённого сигнала РМБ (отмечены толстыми штрих-точечными стрелками). Тонкими штриховыми стрелками показаны участки, имеющие комнатную температуру. При растяжении ОВ из-за продольных нагрузок во всех экспериментах [1, 4] на графиках интенсивности обратно отражённого сигнала СРМБ наблюдались либо снижение интенсивности, либо в идеальном случае – невозрастающий график. При небольших поперечных воздействиях, связанных с неравномерным приложением растягивающей нагрузки, наблюдается заметное снижение интенсивности отражённого сигнала СРМБ. После исключения явных отражательных событий таких, как стыки различных ОВ и т. п., определяются участки ОВ с линейным возрастанием (повышение температуры ОВ) или уменьшением (охлаждение ОВ) мощности обратно отражённого сигнала РМБ вдоль световода [1, 4]. Изменение температуры определяется по формуле:

$$T - T_0 = \frac{P(T)/P(T_0)}{1.0033} = \frac{P(T)[\text{дБ}] - P(T_0)[\text{дБ}]}{1.0145[\text{дБ}^\circ\text{C}]} \quad (3)$$

Это позволяет определить изменение БСЧ и натяжения ОВ при фиксированной температуре $f_B(E_\varepsilon)$ и выделить натяжение из-за продольных растягивающих сил:

$$f_B(E_\varepsilon) = f_{B0} + C_f^E (E_\varepsilon - E_{\varepsilon0}) + f_{BT}, \quad E_\varepsilon = E_{\varepsilon0} + (f_B - f_{B0} - f_{BT}) / C_f^E \quad (4)$$

Упрощение определения потенциально опасных участков в ОВ может быть достигнуто при наличии опорных рефлектограмм. Это могут быть рэлеевские рефлектограммы исследуемых ОВ [1, 4] или характеристики РМБ из базы рефлектограмм. Представленные в данном исследовании результаты позволяют на основании анализа бриллюэновских мульти-рефлектограмм выявлять фактор, который оказал преимущественное влияние на натяжение в исследуемых участках ОВ. Это позволяет повысить эффективность ранней диагностики состояния ОВ в ВОЛС.

Литература

1. Bogachkov I. V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1441.
2. Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V., Rogers A. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers // Optics letters. – 1997. – Vol. 26, № 11. – P. 787–789.

3. Belal M., Newson T. P. Experimental examination of the variation of the spontaneous Brillouin power and frequency coefficients under the combined influence of temperature and strain // Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Vol. 30, № 8. – P. 1250–1255.
4. Богачков И. В. Классификация факторов, вызывающих изменение натяжения оптических волокон, на основании бриллюэновских рефлектограмм // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 184–191.

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

¹Богачков И. В., ²Горлов Н. И.

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

CREATION OF THE DATABASE FOR THE BRILLOUIN SCATTERING CHARACTERISTICS IN DIFFERENT KINDS OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBERS

Bogachkov I.V., Gorlov N.I.

Аннотация

Представлены результаты исследований характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) в одномодовых оптических волокнах различных видов и разных производителей. Приведены примеры частотных профилей РМБ некоторых типов волокон. Данные начальных уровней бриллюэновского сдвига частоты исследованных разновидностей волокон при нормальных условиях сведены в итоговую таблицу.

Как показали исследования [1 – 4], для различных типов одномодовых оптических волокон (ОВ) и для даже однотипных ОВ разных производителей форма спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) и «планки начального уровня» (f_{B0}) бриллюэновского сдвига частоты (БСЧ) для нормальных условий (при комнатной температуре и при отсутствии механических напряжений) различаются.

БСЧ (f_B) связан с характеристиками среды распространения следующей формулой:

$$f_B = 2v_{Aэфф} n_{эфф} / \lambda_L, \quad (1)$$

где $v_{Aэфф}$ – эффективная скорость гипер акустической волны, зависящая от структуры сердечника ОВ, $n_{эфф}$ – эффективный показатель преломления среды, λ_L – длина волны излучающего лазера [1].

Для выявления участков ОВ с повышенным натяжением или изменённой температурой применяют бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (БОИР) [1, 2].

Многочисленные экспериментальные исследования, проведённые с БОИР, ОВ различных типов и производителей, в том числе предоставленных Пермским научным центром Уральского отделения РАН и ООО «Инкаб» (г. Пермь), позволили создать базу данных характеристик РМБ [2].

На рисунке 1 показан профиль СРМБ разновидности ОВ, устойчивого к действию радиации (CeEr008-B270418ECDF) – ОВ, легированное ионами эрбия и церия (ECDF). Профиль СРМБ разновидности ОВ, сохраняющим состояние поляризации, “Panda” PS887-A270318 (“Panda” PS-887) для примера приведён на рисунке 2.

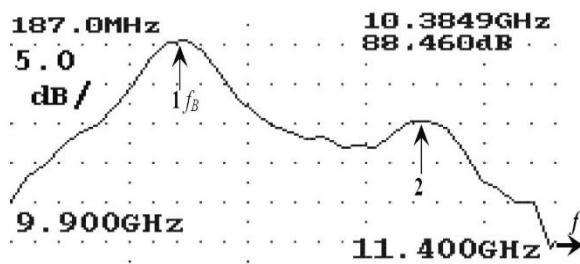


Рисунок 1. Профиль СРМБ ECDF.

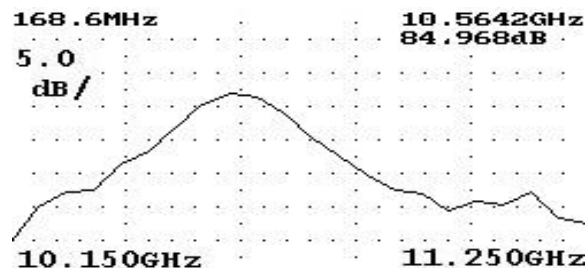


Рисунок 2. Профиль СРМБ «Panda» PS-887.

На рисунках 1 и 2 в левом нижнем углу показаны начальная частота графика, в правом нижнем – конечная, в правом верхнем углу показаны значение БСЧ и интенсивность максимума СРМБ, в левом – ширина СРМБ (по уровню 3 дБ) и шаг сетки по оси интенсивности (5 дБ).

Принципиальным отличием СРМБ для ECDF является то, что кроме основного максимума, который при нормальных условиях наблюдается на частоте 10.39 ГГц (ниже всех ранее исследованных ОВ), обнаруживается и побочный «пик» на частоте 11.08 ГГц. Для каждой разновидности ОВ следует зафиксировать форму профиля СРМБ, определить свой «начальный уровень» f_{B0} и характеристики РМБ. Многочисленные экспериментальные исследования особенностей поведения СРМБ в ОВ различных типов и производителей, проведенные с БОИР, позволили определить начальный уровень БСЧ (f_{B0}) для каждой исследованной разновидности ОВ [1 – 4]. В таблице 1 приведены значения f_{B0} для всех изученных разновидностей ОВ.

Таблица 1

Разновидность ОВ	Значения f_{B0} , ГГц	Рекомендуемые значения f_{B0} , ГГц	$v_{Aэфф}$, км/с ($n = 1.47$)	$n_{эфф}$ ($v_A = 5.71$ км/с)
G.652	10.82 ... 10.86	10.84	5.71	1.468
G.652 LBL	10.84	10.84	5.71	1.468
G.652 Ultra	10.82...10.83	10.82	5.71	1.468
G.652-200 мкм	10.76 ... 10.78	10.77	5.68	1.463
G.653 (DSF)	10.47 ... 10.49	10.47	5.52	1.421
G.655 (NZDSF)	10.61 ... 10.64	10.63	5.61	1.443
G.655-2	10.47 ... 10.48	10.48	5.53	1.422
G.655 (LEAF)	10.66 ... 10.67	10.66	5.63	1.447
G.657	10.77 ... 10.80	10.79	5.70	1.466
EDF	10.69 ... 10.71	10.70	5.64	1.450
EDF-2	10.95	10.95	5.77	1.486
ECDF	10.38 ... 10.39	10.38	5.48	1.409
«Panda»	10.40 ... 10.43	10.42	5.50	1.414
«Panda PS-887»	10.55 ... 10.56	10.55	5.57	1.432

EDF – ОВ, легированное ионами эрбия [4], DSF (G.653) – ОВ со смещённой дисперсией, NZDSF (G.655) – ОВ с ненулевой смещённой дисперсией; LBL, Ultra, LEAF – современные разновидности ОВ компании «Corning» [1, 2]. Величины $v_{Aэфф}$ определяются по формуле (1) при f_{B0} из табл. 1 при $n = 1.47$. Величины $n_{эфф}$ определяются по формуле (1) для f_{B0} из табл. 1 при $v_A = 5.71$ км/с [1 – 4]. При использовании для расчетов f_{B0} из табл. 1 зависимости БСЧ и натяжения от температуры различных ОВ становятся практически идентичными [1 – 4].

Наличие базы данных профилей СРМБ волокон различных типов и производителей позволяет классифицировать ОВ в ВОЛС, а также повысить эффективность ранней

диагностики состояния ОВ, необходимой для прогнозирования эксплуатационных параметров физических каналов оптических телекоммуникационных систем.

Практическую ценность представляет возможность определения структуры и состава слоев, образующих сердечник ОВ, по полученным профилям СРМБ и частотам всех «пииков» СРМБ, так как введение легирующих веществ и изменение их концентрации влияют на скорость гиперзвука в ОВ и эффективный показатель преломления [1 – 4].

Литература

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Изучение особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Телекоммуникации. – 2019. – № 5. – С. 21–29.
2. Bogachkov I. V. The experimental researches of the Mandelstam – Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // T-comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Vol. 13, № 4. – P. 70–75.
3. Bogachkov I. V. Detection of initial level of Brillouin frequency shift in optical fibres of different types // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015.
4. Bogachkov I. V. Research characteristics of the Mandelstam – Brillouin scattering in specialized single-mode optical fibers // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: conference proceeding. – Omsk, 2017.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОВИДНОСТЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК СОСТОЯНИЯ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

¹Богачков И. В., ²Горлов Н.И.

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

AUTOMATED DATA PROCESSING OF BRILLOUIN REFLECTOGRAMS FOR DETERMINING VARIETIES AND CHARACTERISTICS OF THE SINGLE-MODE OPTICAL FIBERS STATE

Bogachkov I.V., Gorlov N.I.

Аннотация

Обсуждены вопросы автоматизации определения разновидностей одномодовых оптических волокон и характеристик их состояния на основе анализа бриллюэновских рефлектограмм. Представлены программы для автоматизированной обработки данных для бриллюэновских рефлектометров.

Наличие базы данных характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) оптических волокон (ОВ) различных типов и разных производителей, которая была сформирована в результате многочисленных экспериментальных исследований [1 – 3], позволяет классифицировать разновидности ОВ, оценивать состояние ОВ в оптическом кабеле (ОК), обнаруживать потенциально ненадёжные участки ОК, прогнозировать долговечность ОВ в ОК.

С целью автоматизации и ускорения процесса формирования базы данных характеристик РМБ ОВ по бриллюэновским рефлектограммам, классификации разновидности ОВ, оценки бриллюэновского сдвига частоты (БСЧ – f_B) и натяжения ОВ были разработаны специальные программы [4, 5].

Работа программ [4, 5] основана на анализе загруженного пользователем выходного файла рефлектометра, после загрузки которого запускается процесс выделения части изображения, необходимой для анализа характеристик РМБ и классификации типа ОВ [10].

Степень совпадения загруженных данных с шаблоном определяется корреляционной оценкой, которая проводится двумя разными способами [1 – 3]. Пользователю могут быть представлены графические изображения всех загруженных шаблонов. В результате работы программы выводится шаблон, который по оценкам программы имеет наилучшее совпадение с загруженным изображением. На рисунке 1 представлена копия экрана после выделения профиля СРМБ. В левом верхнем углу показан загруженный файл распределения спектра РМБ (СРМБ) вдоль ОВ.

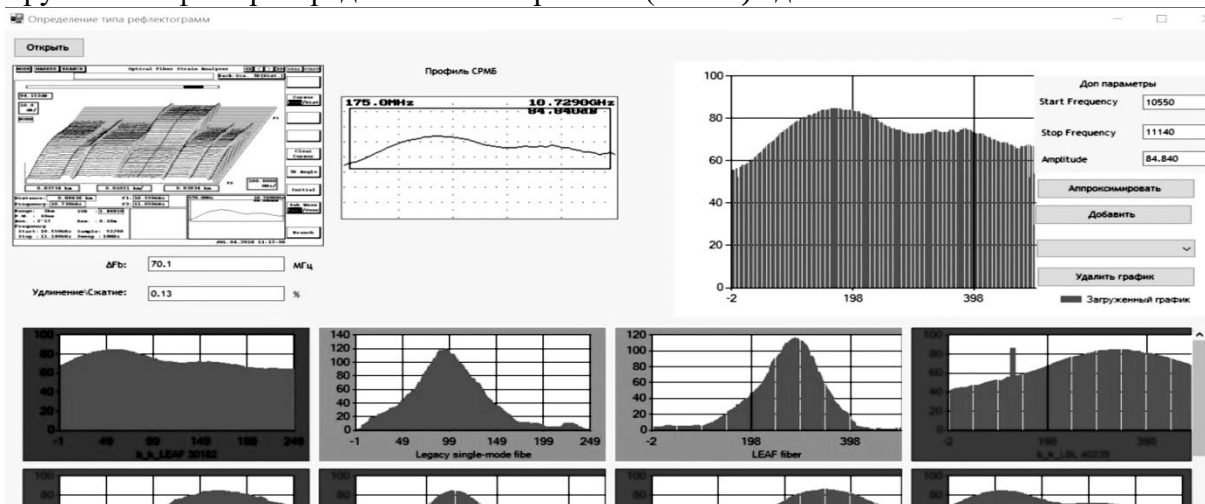


Рисунок 1. Определение разновидности ОВ, БСЧ и уровня натяжения

Необходимая область для анализа автоматически «вырезается» программой, формируется профиль СРМБ ОВ, который выводится на экран (среднее верхнее изображение), а также выделяются данные, необходимые для определения характеристик СРМБ. На следующем этапе программа выводит начальную и конечную частоты сканирования (в ГГц), а также интенсивность (в дБ) уровня обратно отражённого сигнала РМБ в максимуме (правый верхний угол). Пользователь имеет возможность корректировать данные характеристики. После нажатия кнопки «Аппроксимировать» полученный профиль СРМБ ОВ сравнивается с шаблонами из базы данных программы на основе специального алгоритма [1 – 3], а с целью «зрительной помощи» при изучении рефлектограмм шаблон, имеющий наилучшее совпадение, подсвечивается зеленым цветом. Также мы наблюдаем полученные значения изменений БСЧ (в МГц) и натяжения (в %). (В данном примере анализируется ОВ «LEAF», нагретое до +90°C.)

С целью автоматизации и ускорения процесса выявления типа потенциально опасных факторов для ОВ по бриллюэновским рефлектограммам, оценки изменений БСЧ и натяжения была разработана специальная программа [5].

Для работы программы в режиме выявления фактора воздействия и компенсации влияния температуры на БСЧ и натяжение ОВ следует активировать вкладку «Мульти», после чего необходимо загрузить файл мульти-рефлектограммы [2, 5].

Необходимые для анализа данные автоматически выделяются программой, и после этого формируются частотный график СРМБ ОВ, графики натяжения и уровня обратно отражённого сигнала, которые выводятся на экран, и используются для дальнейшего анализа. Также отображается начальная температура («T0»).

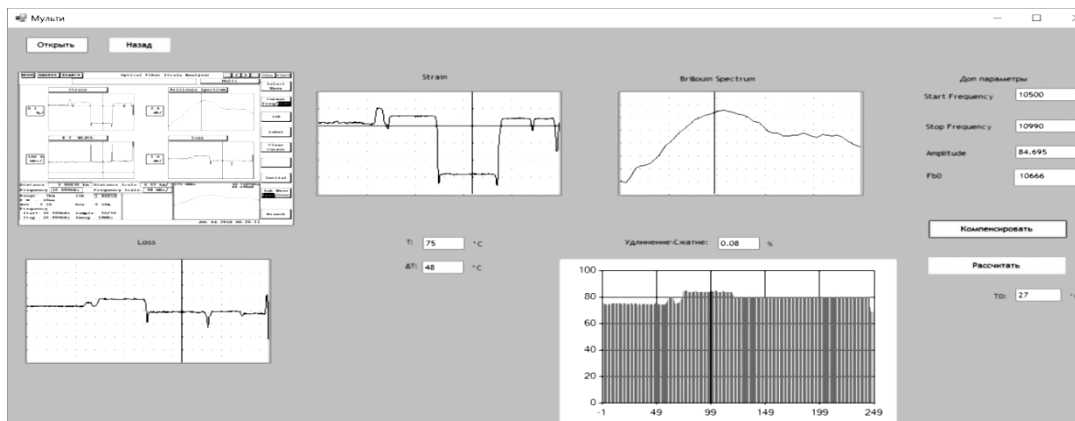


Рисунок 2. Копия экрана при расчете БСЧ, температуры, натяжения и компенсаций изменений натяжения, вызванных изменением температуры

После нажатия кнопки «Рассчитать» производится вычисление изменения БСЧ относительно начального, и далее рассчитывается натяжение ОВ, а также находится температура исследуемого ОВ и её изменения (« ΔT ») относительно начальной (« T_0 »).

По графику уровня обратно отражённого сигнала («Loss») определяется изменение БСЧ, которое вызвано только изменением температуры, и (после нажатия кнопки «Компенсировать») производится соответствующая компенсация в зависимостях продольного натяжения [5].

Литература

1. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Inivatov D. P., Kireev A. P., Gorlov N. I. A classification of optical fibers types on the spectrum profile of the Mandelstam – Brillouin backscattering // *Journal of Physics*. – 2019. – Vol. 1210.
2. Bogachkov I. V., Trukhina A. I. An investigation of the influence of the optical fiber structure on the Mandelstam – Brillouin backscatter characteristics // *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO-2019)*. – Yaroslavl, 2019.
3. Bogachkov I. V., Inivatov D. P., Kireev A. P., Gorlov N. I. A determination of optical fibers types on the spectrum profile of the Mandelstam – Brillouin scatter // *14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018): proceedings*. – Novosibirsk, 2018. – Vol. 1, p. 1. – P. 317–321.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019610752. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам / И. В. Богачков; заявитель ОмГТУ. – заявл. 07.11.2018. – № 2018662391; опубли. 18.01.2019.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019667360. Программа для выявления типа воздействия на оптические волокна и определения их натяжения / И. В. Богачков; заявитель ОмГТУ. – заявлено 13.12.2019. – 2019666447; опубли. 23.12.2019.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Фролов И.В.

ООО «Саранскабель-Оптика», г. Саранск

EVALUATION OF THE REFLECTOMETRIC ATTENUATION MEASUREMENTS ACCURACY OF THE OPTICAL FIBERS

Frolov I.V.

Аннотация

В работе рассматривается влияние флуктуаций уровня сигнала рефлектограмм на точность измерений коэффициента затухания оптических волокон кабелей связи небольшой длины, выполненных рэлеевскими некогерентными рефлектометрами. Выдвинуто предположение о механизме формирования и учета влияния этих флуктуаций на основе решения задачи-прототипа оценки соотношения сигнал/шум при накоплении некогерентного флуктуирующего импульсного сигнала от движущейся цели при радиолокационном обнаружении, с учетом дополнительных потерь: флуктуационных и интегрирования. Экспериментально подтверждено наличие данных потерь в основной задаче и их влияние на точность измерения коэффициента затухания, предложена их оценка, рассмотрена их зависимость от длительности измерительного импульса.

Нормативными документами при производстве, монтаже и испытании кабелей установлен в качестве основного метода измерения коэффициента затухания оптических волокон (ОВ) метод обратного рэлеевского рассеяния (метод С1С [1]), который реализуется при помощи измерения импульсным некогерентным оптическим рефлектометром (OTDR), при этом, предельно допустимой является погрешность измерений 10% [2].

Точность измерения коэффициента затухания ОВ является существенно важной: для кабелей с повышенными требованиями к величине коэффициента затухания ОВ; для оптических кабелей, имеющих длину менее 1 км (могут производиться длиной от 200м); при испытаниях образцов кабельной продукции, имеющих небольшую длину в соответствии с ограниченным размером испытательных установок.

Общепринятым считается, что точность измерения коэффициента затухания ОВ определяется главным образом, систематической ошибкой, определяющейся нелинейностью шкалы рефлектометра [3]. При этом, если на наличие иных составляющих погрешности ранее указывали лишь при измерении параметров неоднородностей [3], выделяя среди них шумовую, поляризационную, интерференционную, то теперь в ряде работ [4..6] исследуют влияние указанных составляющих погрешности на точность измерений коэффициента затухания ОВ.

Систематическая погрешность составляет для современных рефлектометров 1..3% и практически такая точность подтверждается при измерении коэффициента затухания ОВ значительной длины, в то же время, погрешность при длинах ОВ менее 1км может достигать 20% и даже более [4], что является неприемлемым.

Применение рефлектометров с большим динамическим диапазоном [4], а также использование скремблирования, позволяющего уменьшить поляризационную составляющую погрешности измерения, позволяет повысить точность измерений [3], однако минимальная измеряемая длина при этом составляет 0,4..0,6 км, что в 2..3 раза больше требуемой.

В [4] дается оценка шумовой составляющей погрешности измерения в виде прямой зависимости погрешности измерения коэффициента затухания от величины шумовой

дорожки для методов измерения по двум точкам и наименьших квадратов (МНК) в предположении независимости отсчетов рефлектограммы.

В [5] и [6] приводятся оценки интерференционной составляющей погрешности рефлектометра (шумы когерентности), как определяющей при измерении малых длин ОВ, при этом отсчеты рассматриваются как частично коррелированные, с интервалом корреляции, определяемым длиной когерентности лазерного излучения. При этом указанная величина шумовой дорожки составляет 0,03 дБ [6], а длина когерентности лазеров, используемых в некогерентных рефлектометрах, составляет по оценке [3] около 10 мм при ширине шумовой дорожки 0,1 дБ.

На практике же, на рефлектограммах наблюдаются участки с гораздо большим интервалом корреляции, сопоставимым с пространственной длительностью излучаемого импульса (10..30 м), а погрешности измерения коэффициента затухания не имеют строгой связи с величиной шумов и могут быть приемлемыми и при большем уровне шумов, чем указанные, и наоборот, неприемлемыми при меньшем уровне шумов.

В развитии основных выводов [5] и [6] о случайных коррелированных флуктуациях, как основной причине ошибок измерения коэффициента, предложен подход, состоящий в том, что рассматривается взаимодействие некогерентного импульса рефлектометра с флуктуирующими по длине коррелированными неоднородностями волокна, приводящий к результирующим коррелированным флуктуациям амплитуд отраженного сигнала, влияющим на точность измерения при усреднении.

Можно полагать, что данная задача имеет по своей природе прямую аналогию с задачей радиолокации по накоплению и обнаружению импульсного сигнала от движущейся цели, сигнал от которой представляет собой совокупность т.н. «блестящих точек» со случайно меняющимися фазами [7]. При этом, применительно к нашему случаю, «блестящими точками» являются рэлеевские центры рассеяния в пределах разрешаемого участка волокна, обусловленные неоднородностями его структуры. Результирующий сигнал на входе оптимального приемного устройства, в данном случае, представляет собой вектор со случайно изменяющимися амплитудой и фазой. Расчет требуемого соотношения сигнал/шум в этом случае является нетривиальной, но в общем, решенной в статистической радиотехнике задачей. Подобный сигнал, как показано в [8], имеет обобщенное двумерное распределение Рэля (Рэля-Райса), использующее соотношение сигнал/шум в качестве параметра. При этом, при $\rho \geq 1$, сигнал является узкополосным случайным процессом [9], а огибающая этого импульсного сигнала, при оптимальной обработке, на выходе устройства испытывает случайные флуктуации, зависящие от относительного времени корреляции флуктуаций [10]:

$$a = \tau_k / \tau_{\text{и}},$$

где τ_k – интервал корреляции флуктуаций амплитуды; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

При этом, при малых значениях a , т.н. «быстрые» флуктуации амплитуды на входе практически не передаются на выход, а при средних и больших значениях ($a \geq 1$), «медленные» флуктуации передаются на выход практически без изменений. Оптимальные устройства фильтрации в данном случае, для прямоугольного и колоколообразного импульса, представляют собой полосной фильтр и детектор огибающей. Флуктуации параметров волокна, связаны с продольным изменением показателей преломления и рассеяния и могут быть обусловлены как биениями при двулучепреломлении, так и вариациями модового пятна. При этом, на исследованных образцах волокон основная часть флуктуаций имеет диапазон корреляции в десятки метров.

Для решения задачи - прототипа: определения требуемого соотношения сигнал/шум для радиолокационного обнаружения цели в условиях приема пачки некогерентных флуктуирующих импульсов, Д. Бартоном была предложена сравнительно простая эмпирическая методика расчетов [11], которая доказала свою хорошую точность и

эффективность на практике. Согласно нее, требуемое соотношение сигнал/шум для обнаружения пачки импульсов $\rho_{\text{тр}}$ описывается как [7]:

$$\rho_{\text{тр}}(\text{dB}) = \rho_1(D, F) - 10 \lg(N) + L_i(\rho_1, N) + L_f(D, F, N_e) \quad (1)$$

Где $\rho_1(D, F)$ – соотношение сигнал/шум для обнаружения одного импульса с постоянной амплитудой при заданных параметрах вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F ; N – число значений сигнала за время обнаружения; $L_i(\rho_1, N)$ – потери некогерентного интегрирования; $L_f(D, F, N_e)$ – флуктуационные потери;

$$L_f(D, F, N_e) = L_{f0}(D, F)(\text{dB})/N_e;$$

N_e – число независимых значений сигнала из общего числа N ;

$N_e = [1 + T_1/\tau_k]$, где T_1 – время обнаружения, а τ_k – интервал корреляции сигнала;

$T_1 = (1 + N)T_{\text{сл}}$, где $T_{\text{сл}}$ – период следования импульсов.

Все слагаемые в (1) выражены в децибелах, при этом все функционально зависимые величины определяются по номограммам, представляющим собой семейства кривых.

При этом, величины $\rho_{\text{тр}}$ и ρ_1 являются, несомненно, специфическими для конкретной задачи, а вот дополнительные слагаемые, связанные с изменением этих величин при некогерентном накоплении, носят, видимо, универсальный характер.

При большом числе независимых отсчетов и низком соотношении сигнал/шум, формула (1) преобразуется в известную формулу некогерентного накопления

$$\rho_{\text{тр}}(\text{dB}) \approx \rho_1 - 5 \lg(N) \quad (2)$$

которая в других случаях дает либо завышенную, либо заниженную оценку.

Качественный анализ рефлектограмм с учетом приведенных расчетов, для разных длительностей импульсов показал следующее. При длительностях $\tau_{\text{и}} \leq 30$ нс, имеют место быстрые флуктуации большей амплитуды, и $N_e \approx N$, а при $\tau_{\text{и}} \geq 1000$ нс имеют место медленные флуктуации меньшей амплитуды и $N_e \approx T_1/\tau_k$. При промежуточных значениях $\tau_{\text{и}}$, $\tau_k \approx \tau_{\text{и}}$ и имеют место наложения флуктуаций от импульсов и собственных флуктуаций параметров оптического волокна. При этом существенно ухудшается точность измерения. В то же время, $\tau_{\text{и}} = 100$ нс является фактически стандартным временем измерения, позволяющим одновременно получить приемлемую точность измерения коэффициента затухания и пространственное разрешение. Применение импульсов большей длительности ($\tau_{\text{и}} \geq 1000$ нс) увеличивает соотношение сигнал/шум, но уменьшает число независимых отсчетов, что может приводить к медленным флуктуациям и может не улучшить точность. Поэтому, предпочтительнее использовать режим с малыми длительностями измерительного импульса. Также возможно использование совместного анализа рефлектограмм, полученных при разных длительностях импульса.

Благодарность

Выражаю благодарность и признательность Б.Г. Горшкову и С.Г. Акопову за помощь, предоставленные материалы и обсуждение отдельных вопросов.

Посвящаю памяти профессора Национального исследовательского университета МИЭТ (Зеленоград, г. Москва) Д.В. Незлина, моего учителя.

Литература

1. ГОСТ Р МЭК 793-1-93 Волокна оптические. Общие технические требования.
2. ГОСТ 26814-86. Кабели оптические. Методы измерения параметров.
3. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон – М., ЛЕСАРпт, 2005, стр.208.
4. Фролов И.В. «Точность рефлектометрических измерений коэффициента затухания при производстве волоконно-оптических кабелей связи», II Всероссийская научно-практическая конференция «Оптическая рефлектометрия 2018», сборник тезисов докладов, Пермь, 2018.

5. Б.Г. Горшков, Г.Б. Горшков, К.М. Жуков. Прецизионное измерение потерь в оптических волокнах малой длины рефлектометрическим методом без использования рэлеевского рассеяния света, *Квантовая электроника*, , 49, №6 (2019).
6. B.G. Gorshkov, M.A. Taranov, A.E. Alekseev. Distributed Stress and Temperature Sensing based on Rayleigh Scattering of Low-coherence Light, *Laser Phys*, 27, 085105(2017).
7. Незлин Д.В. Радиотехнические системы: Уч. Пособие., М., МИЭТ, 2008.-204 с.
8. Б.Р. Левин Теоретические основы статистической радиотехники, Книга первая, Советское Радио, М.:1966 -728 с.
9. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы, Учебник для вузов; 4-е изд, М: Радио и связь, 1986г-512 с.
10. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: Учеб пособие для вузов. – М: Радио и связь, 1986-280 с.
11. Бартон. Простая методика расчета характеристик обнаружения целей и дальности действия РЛС; *Зарубежная радиоэлектроника*, 1970, №5, с.3-21.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ВОЛС ПО РАБОЧИМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ

¹Бобров В.И., ²Гринштейн М.Л., ¹Зюзин М.С.

¹ЧП «Оптиксффт», г. Минск (Белоруссия);

²ЗАО «Институт информационных технологий», г. Минск (Белоруссия)

CERTAIN ASPECTS OF IN-SERVICE OTDR MONITORING OF OPTICAL FIBER LINES

Bobrov V.I., Greenstein M.L., Zyuzin M.S.

Аннотация

Рассмотрены источники помех, вызывающих ухудшение качества измерений рабочих ОВ при мониторинге ВОЛС с помощью оптического рефлектометра. Определены способы уменьшения их влияния.

Мониторинг волоконно-оптических линии связи (ВОЛС) с использованием оптических рефлектометров применяется, как правило, для контроля основных физических параметров линии: длины и полного затухания, расстояния до мест соединения оптических волокон (ОВ), затухания в соединениях, коэффициента затухания участков. Главная задача мониторинга – определение места повреждения ВОЛС и прогнозирование возможных повреждений на основе постоянных измерений и анализа их результатов. Под повреждением ВОЛС при этом понимается такое изменение любого параметра (или его абсолютное значение), которое превышает пороговое значение, заданное оператором. Анализ результатов измерений проводится программным обеспечением системы мониторинга в автоматическом режиме, поэтому существует и другая важная задача: не допустить принятия ошибочных решений о повреждениях ВОЛС.

Как правило, при анализе состояния ВОЛС прежде всего проводится сравнение двух рефлектограмм: текущей–измеренной в данный момент времени, и базовой – измеренной до начала мониторинга, когда состояние ВОЛС считалось "нормальным". Отличие текущей рефлектограммы от базовой может быть вызвано как реальным изменением параметров линии, так и изменением характеристик или режима работы рефлектометра. При мониторинге рабочих ("светлых", "занятых") ОВ ошибочные решения могут быть вызваны воздействием информационного сигнала на рефлектометр. Его степень зависит, в том

числе, и от взаимного расположения рефлектометра и передающего оборудования системы связи.

При мониторинге ВОЛС по рабочим ОВ длины волн сигнала связи и рефлектометра разнесены достаточно далеко, чтобы обеспечить их эффективную фильтрацию и устранить взаимное влияние. Например, они могут быть 1550 нм и 1625 нм соответственно. Однако, вследствие особенностей спектра источников сигналов, параметров оптических фильтров и характеристик рассеяния излучения полностью устранить помехи не удастся.

Для объединения, разделения и фильтрации оптических сигналов в системе мониторинга применяются TFF (thin film filters) мультиплексоры. Они имеют широкие спектральные полосы пропускания и поглощения излучения. Практически вся мощность излучения лазеров сосредоточена около центральной длины волны, однако очень небольшая часть полной мощности распределена далеко за границами этой области. На рисунке 1 показан спектр РОС-лазера с длиной волны 1550 нм на входе и выходе TFF фильтра с границей полосы пропускания около 1590 нм. Такой фильтр используется для ослабления информационного сигнала на входе рефлектометра. Из рисунка 1 видно, что основная длина волны лазера эффективно подавляется, но часть мощности (суммарно, около -40...-45 дБм) без потерь проходит через него. Поскольку в рефлектометре используется лавинный фотодиод с высоким коэффициентом усиления, то такая и даже меньшая помеха существенно увеличивает его шум.

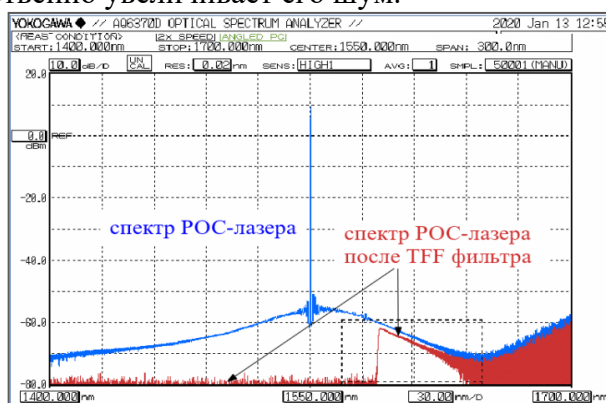


Рисунок 1. Спектр РОС-лазера с длиной волны 1550 нм на входе и выходе TFF фильтра с границей полосы пропускания около 1590 нм.

Уменьшение мощности помехи может быть достигнуто сдвигом переходной полосы на 10...15 нм в область больших длин волн, однако производители фильтров не контролируют ее положение. Наличие излучения в далеких от центральной длины волны областях спектра приводит также к значительной ошибке при определении ослабления фильтра с помощью обычного источника излучения и измерителя оптической мощности. Кроме того, поскольку величина этой "фоновой" мощности слабо зависит от мощности лазера на центральной длине волны, то при измерениях получаются разные значения ослабления помехи при разной мощности источника.

Еще одним фактором, вызывающим помехи в работе рефлектометра, является стоксова компонента рамановского рассеяния сигнала связи. Ее спектр также попадает в полосу пропускания фильтра рефлектометра. Анализ и измерения показывают, что если в ОВ присутствует только спонтанное рамановское рассеяние, то влияние на рефлектометр меньше, если источник сигнала связи работает ему навстречу. При увеличении мощности источника возникают небольшие искажения рефлектограммы: коэффициент затухания участка рефлектограммы, ближнего к источнику сигнала связи, уменьшается примерно на 0,01 дБ/км. При возникновении нелинейных эффектов в ОВ шумы и искажения рефлектограммы становятся очень значительными. Ослабление их влияния возможно оптимизацией режимов работы приемника рефлектометра.

ОТКЛИК ФАЗОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ОДНОРОДНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

¹Алексеев А.Э., ²Горшков Б.Г., ¹Потапов В.Т., ^{1,3}Симикин Д.Е., ^{1,3}Таранов М.А.

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино;

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва;

³ООО «Петрофайбер», г. Москва

PHASE-OTDR RESPONSE TO UNIFORMAL EXTERNAL PERTURBATION

Alekseev A.E., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E., Taranov M.A.

Аннотация

В работе рассматривается вопрос об отклике когерентного фазового рефлектометра на внешнее воздействие. В общем случае отклик содержит в себе, как случайный, так и детерминированный, линейный относительно внешнего воздействия, вклад. В настоящей работе теоретически и экспериментально показано, что при однородной деформации чувствительного волокна случайная составляющая отклика в среднем линейна относительно внешнего воздействия. Экспериментально рассмотрен отклик волоконного интерферометра рассеянного излучения (ВИРИ), а также одной из схем рефлектометра.

Откликом фазового рефлектометра на внешнее воздействие является соответствующее измеренное изменение фазы оптического поля, рассеянного в обратном направлении участком оптического волокна. В силу случайности распределения рассеивающих центров в волокне отклик является случайной величиной. Предсказать форму отклика можно, например, с использованием численных методов [2]. В работе [3] показано, что при внешних воздействиях, вызывающих малую деформацию оптического волокна, случайный отклик в среднем линейен относительно воздействия, в настоящем исследовании показывается, что даже при значительных величинах однородной деформации среднее значение отклика по-прежнему остается линейным относительно внешнего воздействия. Экспериментальное исследование отклика рефлектометра на однородное воздействие производилось с помощью одной из ранее предложенных схем [4]. Серия предварительных экспериментов производилась с помощью ВИРИ, который является составной частью рефлектометра [5]. При однородной деформации оптического волокна ВИРИ производилось сравнение демодулированных сигналов ВИРИ и демодулированных сигналов волоконного интерферометра Майкельсона, образованного тем же оптическим волокном, что и ВИРИ, но с зеркалом на его торце. Аналитическое рассмотрение и математическое моделирование показывают, что усреднённый по ансамблю распределений центров рассеяния отклик ВИРИ равен половине отклика интерферометра Майкельсона. Усреднение отклика ВИРИ производилось по частоте оптического излучения. В эксперименте с рефлектометром усреднение производилось по различным пространственным каналам.

На рисунке 1 показана схема экспериментальной установки. На пьезокерамическое кольцо было намотано чувствительное волокно длиной около двух метров, на кольцо подавалось гармоническое напряжение с частотой 200 Гц. Изменение геометрических размеров кольца приводило к равномерной деформации волокна. Для демодуляции сигналов интерферометров, фаза оптического излучения в опорном плече последовательно смещалась на 0, $-2\pi/3$, $2\pi/3$ радиан [6]. Результаты эксперимента показаны на рис.2.

Отдельные реализации откликов ВИРИ показаны тонкими линиями, их усреднение показано жирной синей линией, отклик интерферометра Майкельсона показан жирной черной линией. Видно, что усредненный отклик ВИРИ - гармонический с амплитудой в два раза меньшей амплитуды отклика интерферометра Майкельсона. Усреднение по 100 пространственным каналам в эксперименте с рефлектометром при условии одинакового воздействия на 100 каналов позволило произвести восстановление музыкального фрагмента с достаточным качеством.

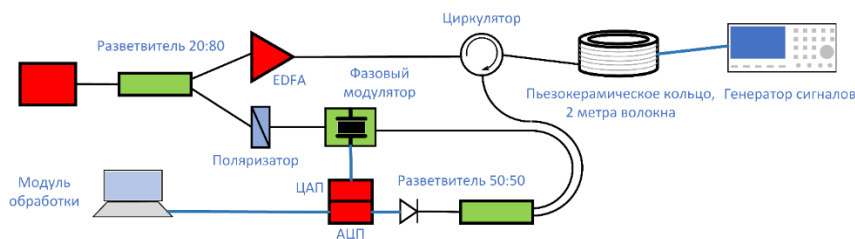


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

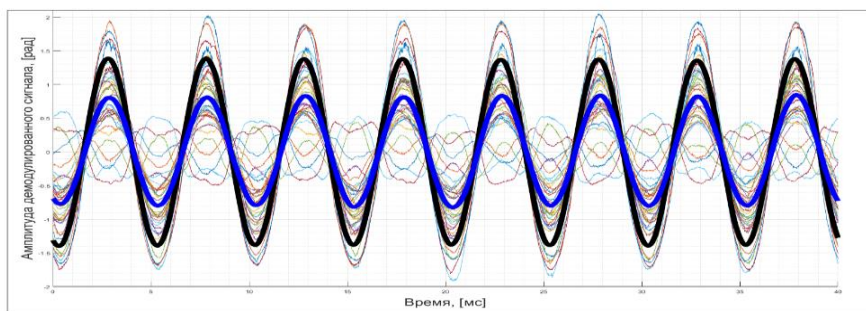


Рисунок 2. Отклик интерферометра.

Литература

1. Hartog A, Kader K 2015 U.S. Patent No. 9,170,149. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
2. Alekseev, A. E., Gorshkov, B. G., Potapov, V. T., Taranov M.A. Simikin D.E. Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance - *Laser Physics*, 30(3), 2020. -p. 035107.
3. Alekseev, A. E., Gorshkov, B. G., Potapov, V. T. Fidelity of the dual-pulse phase-OTDR response to spatially distributed external perturbation- *Laser Physics*, 29(5), 2019. -p. 055106.
4. Alekseev, A. E., Vdovenko, V. S., Gorshkov, B. G., Potapov, V. T., Sergachev, I. Y. A., Simikin, D. E. Phase-sensitive optical coherence reflectometer with differential phase-shift keying of probe pulses - *Quantum Electronics*, 44(10), 2014. -p.965.
5. Alekseev, A. E., Tezadov, Y. A., & Potapov, V. T. Intensity noise limit in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer with a semiconductor laser source - *Laser Physics*, 27(5), 2017. -p. 055101.
6. Alekseev, A. E., Vdovenko, V. S., Gorshkov, B. G., Potapov, V. T., Simikin, D. E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal - *Laser Physics*, 24(11), 2014, -p.115106.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КАЛИБРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ С ПИКОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

¹ Колмогоров О.В., ¹ Щипунов А.Н., ¹ Донченко С.С., ¹ Прохоров Д.В., ¹ Дейкун А.В.,
¹ Чемесова Е.В.

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений, г. Менделеево*

METHODS AND INSTRUMENTS OF OPTICAL REFLECTOMETERS CALIBRATION WITH PICOSECOND RESOLUTION

Kolmogorov O.V., Schipunov A.N., Donchenko S.S.,
Prokhorov D.V., Deikun A.V., Chemesova E.V.

Аннотация

Предложен метод передачи единицы времени от эталонов к импульсным оптическим рефлектометрам с пикосекундным разрешением, основанный на использовании оптических мер задержки и высокоточных измерителей временных интервалов. Приведены основные положения методики калибровки рефлектометров с использованием предложенного метода и результаты экспериментальной апробации методики калибровки.

При разработке, испытаниях и эксплуатации систем сравнения и синхронизации шкал времени, использующих волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [1, 2], при контроле характеристик прецизионных волоконно-оптических устройств [3], возникает задача проведения высокоточных измерений задержек распространения сигнала в оптических волокнах с погрешностью, не превышающей десятков пикосекунд. Большинство существующих оптических рефлектометров, предназначенных для измерений параметров телекоммуникационных сетей связи, не позволяют решить данную задачу, так как они имеют более низкую точность, а специализированные рефлектометры высокого разрешения, работающие в частотной области, имеют недостаточный диапазон измеряемых длин оптического кабеля.

Для решения указанной задачи разработан импульсный оптический рефлектометр [4, 5], предназначенный для измерений задержек распространения сигнала как в компактных оптических элементах, так и в оптических кабелях длиной десятки километров. Особенностью этого прибора является использование измерителя временных интервалов с пикосекундным разрешением, а также встроенной катушки оптического волокна для устранения «мертвой зоны» в начале диапазона измерений. Выбранная конструкция прибора позволяет обеспечить требуемый диапазон длин измеряемых оптических кабелей за счет применения импульсного лазера с высокой пиковой мощностью и фотоприемного устройства с импульсным усилителем.

Для подтверждения точности и достоверности измерений созданным рефлектометром необходимо обеспечить его прослеживаемость к эталонам, в частности, разработать методику его калибровки. Широко используемый метод передачи единицы времени распространения сигнала в световоде от рабочих эталонов к оптическим рефлектометрам, основанный на применении генераторов оптических импульсов с нормированной задержкой, непригоден в данном случае, так как существующие рабочие эталоны имеют недостаточную для данной задачи точность. Поэтому для калибровки рефлектометров с пикосекундным разрешением выбран метод, основанный на использовании оптических мер задержки – катушек оптического волокна. Задержки сигнала в катушках оптоволокна заранее определяются с помощью измерительной установки, включающей эталонную аппаратуру для измерений интервалов времени и

комплект оптико-волоконных устройств [6]. Эталонная аппаратура представляет собой высокоточный измеритель временных интервалов (ИВИ), работающий от сигнала опорной частоты с высокостабильного стандарта частоты и времени. Для повышения точности измерений в качестве ИВИ можно использовать цифровой запоминающий осциллограф и обработку зарегистрированных им данных с использованием метода аппроксимации формы импульсов, изложенного в работе [7].

В ходе калибровки рефлектометра регистрируются его показания при измерениях задержки в каждой катушке оптического волокна, а также проводится определение поправок к его показаниям, представляющих собой разность средних значений показаний рефлектометра и значений задержек, измеренных эталонной аппаратурой. Значения поправок к показаниям рефлектометра, определенных в ряде точек его диапазона измерений, используются в дальнейшем при эксплуатации рефлектометра для повышения его точности. Суммарную стандартную неопределенность $u_s(\tau)$ определения поправок к показаниям рефлектометра оценим согласно формуле (1):

$$u_s(\tau) = \sqrt{u_A(\tau_s)^2 + u_A(\tau_p)^2 + u_B(\tau)^2},$$

где $u_A(\tau_s)$ – неопределенность измерений задержки сигнала в катушке волокна, выполненных эталонной аппаратурой, оцененная по типу А; $u_A(\tau_p)$ – неопределенность измерений задержки сигнала, выполненных рефлектометром, оцененная по типу А; $u_B(\tau)$ – неопределенность измерений интервалов времени эталонной аппаратурой, оцененная по типу В.

В результате исследований определены требования к эталонной аппаратуре и требования к условиям измерений, обеспечивающие уменьшение влияния температурной нестабильности задержек, разработан проект методики калибровки оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением и проведена экспериментальная апробация методики калибровки. Значения неопределенности измерений при калибровке, оцененные по типу А, не превысили 10 – 30 пс, значения неопределенности, оцененной по типу В, не превысили 30 – 40 пс, а значения расширенной неопределенности измерений задержек распространения сигнала оптическим рефлектометром не превысили 100 пс. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения разработанной методики калибровки для определения действительных значений метрологических характеристик оптических рефлектометров с пикосекундным разрешением.

Литература

1. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // *Измерительная техника*. 2015. № 1. С. 14–17.
2. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В., Був С. Г. Система встречных сравнений шкал времени // *Альманах современной метрологии*.
3. Щербаков В. В., Солодков А. Ф., Шелков Н. В., Озеров Ю. В. Экспериментальное исследование отечественного оптического волокна в составе волоконно-оптической линии задержки // *Фотон-Экспресс*, 2016, №1 (129).
4. Колмогоров О. В., Щипунов А. Н., Прохоров Д. В., Донченко С. С., Був С. Г. Разработка оптического рефлектометра для высокоточного определения задержек распространения сигнала в волоконно-оптических линиях связи // *Вестник метролога*. 2018. № 2. С. 3-7.
5. Прохоров Д. В., Колмогоров О. В., Донченко С. С., Був С. Г. Оптический рефлектометр. Патент на изобретение *RUS RU 2 655 046 C1* 26.06.2017.
6. Колмогоров О. В., Щипунов А. Н., Денисенко О. В., Донченко С. С., Прохоров Д. В., Був С. Г., Чемесова Е. В. Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением // *Измерительная техника*. 2020. № 1. С. 30 – 34.
7. Колмогоров О. В., Дейкун А. В., Чемесова Е. В. Установка для измерений задержек распространения сигналов в оптических элементах // *Альманах современной метрологии*. 2020. № 1 (21). С. 126 – 135.

ПРОСТОЙ СПОСОБ ЛОКАЛИЗАЦИИ СОБЫТИЙ НА РЕФЛЕКТОГРАММАХ ГРУППЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ОДНОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО КАБЕЛЬНОГО УЧАСТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

^{1,2,3}Бурдин А.В., ¹Бурдин В.А., ⁴Дельмухаметов О.Р., ¹Евтушенко А.С.,
³Желудков М.А., ¹Зайцева Е.С.

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Самара

²АО «Научно-производственное объединение «Государственный оптический институт
им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург

³ООО «ЛинкИн Тех», г. Уфа

⁴Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

A SIMPLE METHOD OF LOCALIZING EVENTS IN A GROUP OF OPTICAL FIBERS REFLECTOGRAMS AT ONE ELEMENTARY CABLE PART OF A FIBER-OPTICAL TRANSMISSION LINE

Burdin A.V., Burdin V.A., Delmukhametov O.R., Evtushenko A.S., Zheludkov M.A. , Zaitseva E.S.

Аннотация

В работе представлен простой способ автоматизированной локализации событий на рефлектограммах группы оптических волокон одного элементарного кабельного участка волоконно-оптической линии передачи. Данное решение в первую очередь ориентировано на определение местоположения наиболее "проблемных", с точки зрения автоматизированного поиска, событий "без отражения", которые соответствуют сварным соединениям ОВ, выполненным с вносимыми потерями существенно меньше нормативных значений, при одновременно близких значениях коэффициентов обратного рассеяния этих соединенных ОВ.

Как показывает практика, наиболее «проблемными», с точки зрения локализации событий на характеристиках обратного рассеяния оптических волокон (ОВ) при выполнении приемо-сдаточных измерений в процессе паспортизации элементарного кабельного участка (ЭКУ) тестируемой волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), являются "объекты без отражения", соответствующие сварным соединениям, выполненным с вносимыми потерями существенно меньше нормативных значений при одновременно близких значениях коэффициентов обратного рассеяния этих соединенных ОВ. Обычно поиск такой неоднородности является достаточно трудоемким процессом и в подавляющем большинстве случаев реализуется непосредственно самим измерителем в ручном режиме. При этом нередко локализация описанного события вообще невозможна ввиду ограничениями разрешающей способности по уровню мощности потока обратного рассеяния самого средства измерения – полевого оптического рефлектометра обратного рассеяния во временной области (OTDR), который, для подавляющего большинства типовых коммерческих моделей составляет 0.02 дБ [1, 2].

Известно достаточно большое количество публикаций, посвященных разработке вспомогательных методов анализа характеристик обратного рассеяния с применением разнообразных подходов теории цифровой обработки сигнала, среди которых отдельной популярностью пользуется вейвлет-анализ: в оптической рефлектометрии данный подход активно используется для подавления шума характеристики обратного рассеяния, а также для решения задачи автоматизированной локализации обрыва (конца линии) или неоднородностей с Френелевским отражением при малом динамическом диапазоне OTDR

[3, 4], а в отдельных случаях – непосредственно регистрации "событий без отражения" [5, 6]. Однако и здесь не снимается описанная проблема локализации "малогабаритных событий", т.к. описанные в указанных публикациях методы декларируют возможность локализации данных объектов на при показаниях вносимых потерь OTDR от 0.05 дБ и выше.

В отличие от известных решений, предлагаемый подход ориентирован на обработку не одиночной характеристики обратного рассеяния, а непосредственно сразу нескольких рефлектограмм группы ОВ одного ЭКУ ВОЛП [7] и предполагает сопоставление таблиц событий измеренных рефлектограмм ОВ с проверкой введенных в [7] условия контрольной суммы расстояний до одного и того же события в противоположных направлениях относительно оптической длины ЭКУ и условия принадлежности пары событий на рефлектограммах разных ОВ одного направления к одному событию.

В работе представлены результаты апробации предложенного подхода и разработанной на его основе методики анализа характеристик обратного рассеяния ОВ как на рефлектограммах ОВ макетных линий, так и реальных ЭКУ введенных в эксплуатацию ВОЛП.

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках проекта №. 1621ГСИ/24340 (код 0024340).

Литература

1. *Understanding OTDRs.* – GN Nettest, 2000. – 70 p.
2. *Листвин, А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон* – М.: ЛЕСАПарт, 2005. – 208 с.
3. *Chaoju H., Jun L. The application of wavelet transform in analysis of OTDR curve // 2nd IEEE International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics.* – 2010. – P. 216 – 219.
4. *Wen-Gang H., Bao-Ji L., Lin Zh., Wie Y. Study on the detection signal of OTDR based on wavelet denoising and approximate entropy // Proceedings of IEEE Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO).* – 2012. – P. 12948029-1 – 12948029 -4.
5. *Zhang X., Zhaoy H., Sunz G., Cuix T. Localization of non-reflective events in OTDR data combining DWT with template matching // 4th IEEE International Congress on Image and Signal Processing.* – 2011. – P. 2275 – 2279.
6. *Acar H. Analysis of OTDR measurement data with wavelet transform // Advanced Research in Electrical & Electronics Systems.* – 2016. – vol. 1(1). – P. 1 – 5.
7. *Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р., Желудков М.А., Зайцева Е.С. Способ локализации событий на рефлектограммах группы оптических волокон одного элементарного кабельного участка волоконно-оптической линии передачи // Патент RU 2698962. 2019. Бюл. №25.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ OTDR РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Григорьев В.В., Митюрёв А.К., Науменко Е.А., Погонышев А.О., Подюкова Л.В.,
Савкин К.Б., ¹Тихомиров С.В.

¹Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
г. Москва

IMPROVEMENT OF METROLOGICAL METHODS FOR OTDRS

Grigoryev V.V., Mityurev A.K., Naumenko E.A., Pogonyshchev A.O., Podyukova L.V.,
Savkin K.B., Tikhomirov S.V.

Аннотация

В докладе представлены результаты работ по совершенствованию системы обеспечения единства измерений параметров оптических рефлектометров. Описываются созданная во ВНИИОФИ эталонная база, направления и методы ее совершенствования.

Для обеспечения информационных потребностей пользователей интернета, IP телевидения, передачи данных между отделами международных корпораций, а также систем связи на основе 5G, операторам связи необходимо постоянно развивать волоконно-оптические линии связи. Оптические рефлектометры (ОР), работающие во временной области (английская аббревиатура OTDR), являются одним из основных диагностических приборов, позволяющих оценивать качество волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) при прокладке и эксплуатации линий, а также при выпуске пассивных компонентов ВОСП - оптических волокон (ОВ) и волоконно-оптических кабелей (ОК). ОР позволяют измерять длину ОВ и ОК, расстояние до мест неоднородности и ослабление оптического сигнала в волоконно-оптических системах. Объем рынка ОР (и возрастающие требования по точности) синхронно увеличивается с развитием отрасли и ростом скорости передачи данных по волоконным линиям связи. Вместе с этим растёт потребность в быстром и качественном метрологическом обеспечении измерений, а именно, в поверке и калибровке приборов данного типа.

С 2006 г. во ФГУП «ВНИИОФИ» введен в строй Государственный первичный специальный эталон ГЭТ 170-2011 (ГПСЭ), от которого единицы длины и ослабления передаются к рабочим эталонам (РЭ) и далее к ОР согласно разработанной и внедрённой поверочной схеме [1]. В соответствии с рекомендациями МЭК (IEC) [2] по методам калибровки OTDR, в РЭ используется активный метод передачи единиц длины и ослабления [3,4]. С этой целью, в составе РЭ применяются специальные оптические генераторы (ОГ), имитирующие прохождение оптического излучения по ОВ. ОГ вырабатывает в ответ на зондирующий импульс поверяемого ОР пару “эталонных” импульсов с задаваемыми с высокой точностью временными интервалами и перепадами амплитуд между ними, что позволяет моделировать прохождение излучения по ОВ и нормировать шкалы затухания и длины. Его применение позволяет полностью решать вопросы поверки, испытаний и калибровки в части нормирования шкал затухания и длины в широком диапазоне значений, избегая влияния целого ряда составляющих погрешности, характерных для применения образцов ОВ в качестве мер. Данный метод, по сравнению с другими, использующими набор образцов ОВ или рециркулятор [2], хорошо себя зарекомендовал как наиболее быстрый, масштабируемый и гибкий при поверке и калибровке ОР.

В настоящее время во ФГУП «ВНИИОФИ» ведутся работы по совершенствованию ГПСЭ и РЭ в части единиц длины и ослабления с целью поддержания современного уровня метрологического обеспечения ОР. На данный момент существует потребность в

совершенствовании РЭ в связи с увеличением точности и расширением диапазонов измерений ОР, а также расширением рабочего спектрального диапазона. Таким образом, условно можно выделить два направления совершенствования РЭ. Эксплуатационное – расширение количества рабочих длин волн РЭ, и метрологическое – уменьшение погрешности воспроизведения единиц РЭ и расширение диапазонов по шкале длины и ослабления. Второе направление развития подразумевает, что совершенствованию должны также подвергнуться методы и средства калибровки оптических генераторов (ОГ), входящий в состав РЭ.

Задача первого направления совершенствования РЭ решается схмотехническими методами и, как правило, с этим не возникает проблем, существуют только некоторые технические трудности совмещения одномодовых (от 1310 до 1650 нм) и многомодовых (850 нм) лазеров в одном оптическом канале ОГ. Второе направление направлено на увеличение точности и уменьшение дискретности по шкалам длины и ослабления Рабочих эталонов. Для выполнения данной задачи была реализована стабильность ОГ во временной области путем использования термокомпенсированного задающего генератора частотой 400 МГц. Собственно, задающий генератор импульсов представляет собой встраиваемый модуль на основе ПЛИС ALTERA Cyclone IV. Его задачей является генерация импульсов управления лазерными источниками оптического генератора заданной длительности и сдвига. Применение задающего генератора частотой 400МГц и использование прямых и инверсных тактовых импульсов позволило повысить разрешение установки временных интервалов до 1,5 нс (0,15 м), при этом удалось достичь абсолютной погрешности по длине $(0,1+3 \cdot 10^{-6}L)$, м, где L – значение длины. Следует отметить, что использование термокомпенсированного задающего генератора с долговременной стабильностью $1,5 \cdot 10^{-6}$ с низкими фазовым шумом (на уровне -60 дБн/Гц на частоте 10 Гц), современной ПЛИС с внутренней фазовой автоподстройкой частоты (PLL) и выравниванием внутренних задержек в процессе синтеза с применением идентичных клоковых деревьев позволяет уменьшить джиттер оптического выходного сигнала, отрицательно влияющего на точность калибровки оптического генератора первичным эталоном.

Что касается увеличения точности по шкале ослабления, то для решения данной задачи в оптическом генераторе лазерные диоды работают в режиме стабилизации оптической мощности током накачки, что позволяет получить одинаковую по уровню мощность излучения как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы. Для обеспечения этого режима необходимо использовать высокостабильный источник тока в цепи накачки лазерных диодов и термостабилизацию самих лазерных диодов. Стабильная температура источников (каждого в отдельности) обеспечивается блоком термостабилизации, для отвода тепла лазерные диоды укомплектованы радиаторами, а корпус непрерывно вентилируется. В результате принятия данных мер обеспечивается приведенная погрешность воспроизведения единицы ослабления, равная 0,015 дБ/дБ (отметим, что эта погрешность дана для всех лазерных диодов), а в отдельных случаях удается достичь 0,010 дБ/дБ. Таким образом, проведенные работы по совершенствованию РЭ единиц длины и ослабления оптического сигнала в световоде позволяют реализовать насущные потребности операторов волоконных линий связи в виде метрологического обеспечения используемых ими современных оптических рефлектометров.

Разработанная в настоящее время система метрологического обеспечения измерений с помощью оптических рефлектометров, включающая государственный первичный специальный эталон, рабочие эталоны, и нормативную документацию, обеспечивает выполнение необходимых работ по метрологическому обеспечению измерений основных параметров ОР. Дальнейшие работы в данной области предполагается проводить в направлении увеличения точности эталонов, расширения спектральных диапазонов.

Литература

1. ГОСТ 8.585 Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандарт информ, 2015. – 9 с.
2. IEC 61746-1 Ed. 1 OTDR Calibration OTDR for SM fibers.
3. В.Е. Кравцов, А.М. Лукьянов, Л.В. Подюкова, С.В.Тихомиров, *Современные оптические рефлектометры: вопросы метрологического обеспечения.- Метрология и измерительная техника в связи.№2,1999. Стр.38.*
4. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Мороз Е.А., Погоньшев А.О., Подюкова Л.В., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. *Современные оптические рефлектометры: вопросы метрологического обеспечения (обзор) Фотон-экспресс. 2018. № 5 (149). С. 18-21.*

АСПЕКТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Григорьев В.В., Митюрёв А.К., Науменко Е.А., Погоньшев А.О., Подюкова Л.В.,
Савкин К.Б., Тихомиров С.В.

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
г. Москва*

SOME ASPECTS OF MODERN OPTICAL REFLECTOMETERS METROLOGICAL SUPPORT

Grigoryev V.V., Mityurev A.K., Naumenko E.A., Pogonyshev A.O., Podyukova L.V.,
Savkin K.B., Tikhomirov S.V.

Аннотация

В докладе представлены результаты работ по обеспечению единства измерений параметров оптических рефлектометров, применяемых в волоконно-оптических системах передачи и информационно-измерительных системах на основе волоконно-оптических датчиков. Рассматриваются результаты внедрения и применения созданных эталонов, а также направления их совершенствования.

В общем смысле оптический рефлектометр (ОР) – это средство измерений (СИ) физических величин, принцип работы которого основан на эффектах обратного рассеяния или отражения электромагнитного излучения в оптически прозрачной среде. Актуальной реализацией таких принципов являются ОР, предназначенные для измерений различных параметров оптического волокна (ОВ) и волоконно-оптического кабеля (ОК), а также компонентов и систем на основе ОВ и ОК. С точки зрения метрологического обеспечения ФГУП «ВНИИОФИ» в той или иной мере сталкивался со следующими видами указанных ОР: - ОР, работающие во временной области, принцип работы которых основан на эффекте рассеяния Рэлея (английская аббревиатура OTDR) в ОВ, предназначены для диагностики волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП), позволяют измерять длину ОВ и ОК, расстояние до мест неоднородностей и ослабление оптического сигнала в ОВ и ОК; - ОР, работающие во временной области, принцип работы которых основан на эффектах рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (английская аббревиатура BOTDR или BOTDA) и Рамана (Raman OTDR), используются в качестве измерительного устройства (вторичного преобразователя) в информационно-измерительных системах (ИИС) на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД) распределённого типа, в основном для измерений

длины, температуры и деформации; - ОР, работающие во временной области, принцип работы которых основан на эффекте рассеяния Рэлея когерентного излучения (английская аббревиатура ϕ -OTDR) в ОБ, используются в качестве измерительного устройства (вторичного преобразователя) в ИИС на основе ВОД распределённого типа, в основном для измерений длины (расстояния) до места воздействия периодического характера на ВОД; - ОР, работающие в частотной области (английская аббревиатура OFDR), принцип работы которых основан на методах частотной интерферометрии [1] в ОБ, предназначены для диагностики бортовых систем связи и изделий интегральной оптики, позволяют измерять длину в ОБ с высоким разрешением (до 10 мкм) в диапазоне малых значений (до 100 м), также могут быть использованы в качестве измерительного устройства (вторичного преобразователя) в ИИС на основе ВОД распределённого типа, в основном для измерений длины, температуры и деформации.

Самым распространёнными из приведённых видов ОР является OTDR ввиду масштабного и быстрого развития ВОСП за последние два десятилетия. Именно для метрологического обеспечения СИ параметров ВОСП, в том числе и OTDR, во ФГУП «ВНИИОФИ» в 2006 г. был создан и в 2011 г. усовершенствован Государственный первичный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для ВОСП ГЭТ 170-2011 (ГПСЭ) и разработана межгосударственная поверочная схема ГОСТ 8.585-2013 [2], модернизированная в 2019 году, регламентирующая передачу соответствующих единиц от верхнего звена – первичного эталона ГПСЭ – к рабочим эталонам (РЭ) и СИ параметров ВОСП. Воспроизведение и передача единицы длины в ГПСЭ производится путем определения значений времени задержки оптического излучения (в том числе в образцах ОБ) с последующим пересчетом к значениям длины. Воспроизведение и передача единицы ослабления производится путем нормирования относительных значений средней мощности излучения. Созданные РЭ, обеспечивающие поверку и калибровку OTDR, основаны на использовании активного метода [3,4] передачи единиц длины и ослабления. С этой целью в составе РЭ применяются специальные оптические генераторы (ОГ), имитирующие прохождение оптического излучения по волокну. С помощью созданных эталонов во ВНИИОФИ проведены испытания и включены в Государственный реестр СИ (ГРСИ) более 60 типов OTDR как иностранных фирм - EXFO, Agilent, Viavi, Yokogawa и др., так и отечественных - ТПК ВП, Связьприбор, Связьсервис. В настоящее время во ФГУП «ВНИИОФИ» ведутся работы по совершенствованию ГПСЭ и РЭ в части единиц длины и ослабления с целью уменьшения погрешности воспроизведения указанных единиц, расширения диапазонов по шкале длины и ослабления, а также расширения рабочего спектрального диапазона.

Следующими по актуальности ОР следуют BOTDR, Raman OTDR и ϕ -OTDR. Эти СИ объединяет то, что с помощью них можно измерять длину в ОБ и ОК. В силу схемотехнических решений РЭ на основе ОГ его применение для метрологического обеспечения таких ОР невозможно. Их поверка и калибровка в части единицы длины осуществляется с помощью ГПСЭ с использованием наборов образцов ОБ соответствующих типов. Для поверки и калибровки BOTDR и Raman OTDR по температуре были разработаны методы с использованием образцов ОБ со специальным покрытием и соответствующих термостатирующих устройств с эталонными термометрами. Для поверки и калибровки BOTDR по деформации используется специально разработанный стенд для натяжения образцов ОБ с использованием лазерной интерференционной измерительной системы XL-80 фирмы RENISHAW [5]. За последние 10 лет специалистами ФГУП «ВНИИОФИ» и других метрологических центров проведены испытания и включены в ГРСИ в общей сложности более 10 типов BOTDR и Raman OTDR. Что касается параметров ϕ -OTDR (кроме длины), то в настоящее время во ФГУП «ВНИИОФИ» проводятся работы по разработке и исследованиям методов калибровки, поверки и испытаний ИИС на основе ϕ -OTDR [6].

Для OFDR в части измерений длины существующие во ФГУП «ВНИИОФИ» методы поверки и калибровки, а также эталонная аппаратура ГПСЭ и РЭ не применима ввиду высоких требований к диапазону и погрешности измерений длины, а также к разрешению. Поэтому на текущий момент ФГУП «ВНИИОФИ» проводит исследования методов и средств метрологического обеспечения указанных ОР [7].

Таким образом, разработанная к настоящему времени система метрологического обеспечения оптических рефлектометров OTDR, BOTDR (BOTDA) и Raman OTDR, включающая ГПСЭ, РЭ и нормативную документацию, обеспечивает выполнение необходимых работ по метрологическому обеспечению измерений их основных параметров. Дальнейшие работы в данной области предполагается проводить в направлении увеличения точности эталонов, расширения спектральных диапазонов и создания эталонной базы для перспективных типов ОР – ф-OTDR и OFDR.

Литература

1. Soller, B.J. Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components / B.J. Soller, M. Wolfe, M.E. Froggatt // *National Fiber Optic Engineer's Conference, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC), paper NWD3 (2005).*
2. ГОСТ 8.585-2013. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандарт информ, 2015. – 9 с.
3. IEC 61746-1 Ed. 1 OTDR Calibration OTDR for SM fibers.
4. В.Е. Кравцов, А.М. Лукьянов, Л.В. Подюкова, С.В.Тихомиров, *Современные оптические рефлектометры : вопросы метрологического обеспечения.- Метрология и измерительная техника в связи.№2,1999. Стр.38.*
5. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Тихомиров С.В., Хатырев Н.П. *Распределенные волоконно-оптические датчики температуры и деформации и вопросы их метрологического обеспечения // Фотоника и её метрологическое обеспечение: Тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции. М.: ВНИИОФИ, 2015.*
6. Григорьев В.В., Митюрёв А.К., Погоньшев А.О., Савкин К.Б, Тихомиров *Метрологическое обеспечение информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков // ВКВО-2019: Тезисы докладов всероссийской конференции по волоконной оптике. Пермь, 2019.*
7. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Мороз Е.А., Погоньшев А.О., Савкин К.Б. Тихомиров С.В. *Методы калибровки OFDR рефлектометров // Оптическая рефлектометрия-2018: Тезисы докладов всероссийской конференции по оптической рефлектометрии. Пермь, 2018.*

МЕТОДЫ НОРМАЛИЗАЦИИ ОТКЛИКА ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЧИРП-РЕФЛЕКТОМЕТРА

Яцеев В.А., Бутов О.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

METHODS OF NORMALIZING THE RESPONSE OF A PHASE-SENSITIVE CHIRP-REFLECTOMETER

Yatseev V.A., Butov O.V.

Аннотация

Когерентная рефлектометрия используется для получения больших объемов акусто-вибрационной информации с многокилометровых участков оптического волокна и находит применение в системах безопасности, скважинном мониторинге, сейсмологии. Часто использование ее ограничивается функциями сигнальной системы, когда есть необходимость определить лишь факт наличия воздействия, но существуют также другие сферы применения, которые требуют построения измерительной системы, позволяющей получать выходной сигнал с заданной точностью в течение длительного времени. Улучшению точностных характеристик измерительных систем на базе когерентных рефлектометров путем внедрения в волокно эквидистантных отражающих точек и нормировки с помощью опорного сигнала, посвящена данная работа.

В общем случае, отклик систем на базе когерентных рефлектометров на воздействия, вызывающие деформации волокна, является нелинейным [1]. Более того, такой отклик, является нестабильным и может изменяться как по времени, так и от участка к участку волокна за счет следующих факторов:

- стохастическая природа рассеивания света в волокне,
- неопределенности положения центров рассеивания (отражателей) относительно проходящего импульса,
- дрейфа сигналов за счет температурных и поляризационных эффектов.

Когерентный рефлектометр, использованный в данном исследовании, был построен на принципе прямого детектирования фазы с помощью чирп-эффекта (рис. 1). Анализ изменения фазы светового излучения производился методом автокорреляции [2,3].

Для нормировки выходного сигнала были использованы два различных метода:

- внедрение искусственных рассеивающих центров в волокно,
- модуляция источника по длине волны на опорной частоте и нормирование отклика на нее.

В первом методе в волоконном световоде с помощью излучения фемтосекундного УФ лазера были созданы отражающие точки, которые располагались эквидистантно на расстоянии 10 метров друг от друга. Для их опроса был использован импульс излучения с длительностью, которая обеспечивала одновременное перекрытие в один момент времени только двух точек, таким образом в каждый момент времени мы могли наблюдать сигнал только с одного интерферометра Фабри-Перо, образованного этими двумя точками [4]. Результаты показали, что точность определения деформации, приложенной к волокну, составляет около 5%.

Второй способ заключался в использовании высококогерентного лазера с возможностью модуляции длины волны со звуковой частотой в пределах частоты опроса полного сигнала с волокна. В данной оптической схеме на измеряемый полезный сигнал накладывался слабый переменный сигнал известной амплитуды. Частота опорного сигнала была выбрана таким образом, чтобы она оказалась вне спектра измеряемого сигнала, например смещенной в верние частоты. Нормировка сигнала проводилась путем

непрерывной корректировки отклика на опорный сигнал. Это позволило также повысить точность измерения внешних воздействия до 1%.

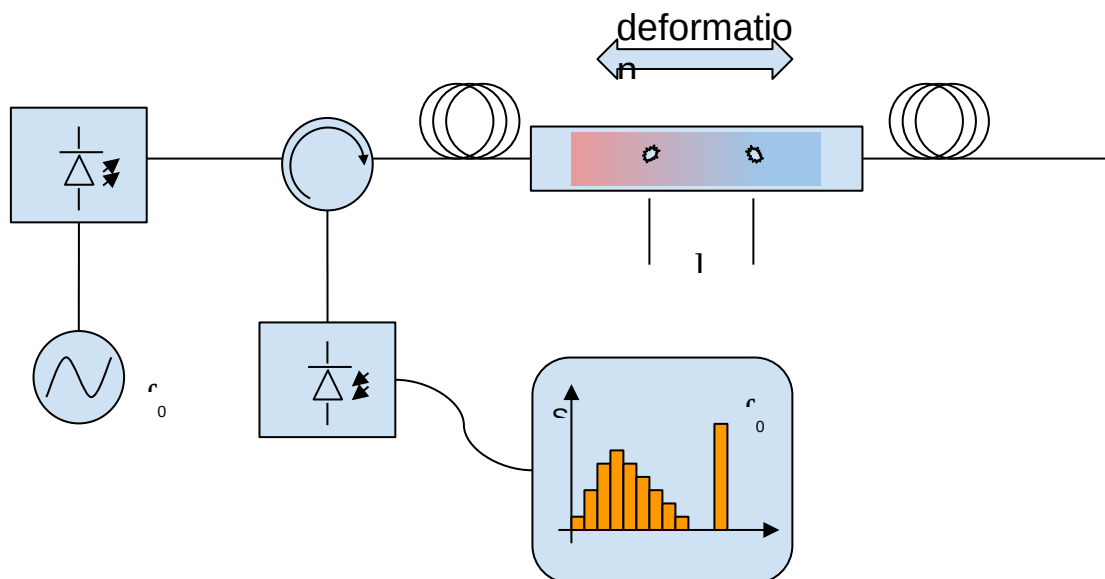


Рисунок 1. Схема фазового чирп-рефлектометра.

Литература

1. Shatalin, S.V.; Treschikov, V.N.; Rogers, A.J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fibre sensing. *Appl. Opt.* 1998, 37, 5600–5604
2. Hari Datta Bhatta , Luis Costa , Andres Garcia-Ruiz , Maria R. Fernandez-Ruiz , Hugo F. Martins, Moshe Tur, Life Fellow, and Miguel Gonzalez-Herraez. Dynamic Measurements of 1000 Microstrains Using Chirped-Pulse Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry - *Journal of Lightwave technology*, vol. 37, N 18, September 15, 2019.
3. Зотов А.М., Качан И.П., Корженевский Д.С., Яцеев В.А., «Фазовая модуляция лазерного импульса в системе опроса волоконно-оптического гидрофона» - *Датчики и системы*, № 2, стр. 61, (2017).
4. Konstantin Hicke, René Eisermann, Sebastian Chruscicki. Enhanced Distributed Fiber Optic Vibration Sensing and Simultaneous Temperature Gradient Sensing Using Traditional C-OTDR and Structured Fiber with Scattering Dots - *Sensors* 2019, 19(19), 4114.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ПРОНИ

Бурдин В.А., Бурдин А.В., Зайцева Е.С.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Самара*

ALGORITHMS FOR PROCESSING OF BACKSCATTERING POLARIZATION CHARACTERISTICS BASED ON PRONY DECOMPOSITION

Burdin V.A., Burdin A.V., Zaitseva E.S.

Аннотация

В работе представлены алгоритмы для обработки поляризационных характеристик обратного рассеяния оптических волокон, базирующиеся на разложении Прони. Приведены методики тестирования предложенных алгоритмов при оценивании поляризационной модовой дисперсии и избыточной длины оптического волокна в кабеле, экспериментальные данные и результаты тестирования.

В данной работе представлены алгоритмы, предназначенные для обработки поляризационных характеристик обратного рассеяния оптических волокон, базирующиеся на разложении по методу Прони, которое основано на применении комплексных экспонент или затухающих синусоид [1]. Известно применение разложения Прони для анализа акустических и сейсмических сигналов, обработки результатов измерений [2-8]. Отмечают его перспективность для анализа коротких импульсов и определения нестационарных компонент, анализа отраженных сигналов в кусочно-регулярных структурах [8]. С учетом вышесказанного, кусочно-регулярной структуры волоконно-оптического тракта и ограничений на число несущих разложения можно предположить потенциальные возможности выделения длины биений при разложении участков характеристик по методу Прони, что собственно и требуется при обработке поляризационных характеристик обратного рассеяния оптических волокон. В основе рассматриваемых алгоритмов лежит аппроксимация отдельных участков характеристики методом разложения Прони [1, 2]:

$$C_{12}(y) = \sum_{k=1}^N A_k \exp(\alpha_k y + j2\pi f_k y + j\theta_k),$$

где $A_k, \theta_k, \alpha_k, f_k$ – параметры разложения Прони; N – число компонент разложения Прони.

Выделяя доминирующие частоты в (1) находим длину биений на участке, а, в итоге, распределение длины биений в оптическом волокне вдоль кабеля.

В работе представлены результаты тестирования предложенных алгоритмов для определения оценок поляризационной модовой дисперсии и распределений избыточной длины оптического волокна в кабеле.

Приведены экспериментальные данные измерений поляризационной модовой дисперсии для двух оптических волокон на трех элементарных кабельных участках протяженностью 50,3 км, 88 км и 73 км, соответственно [9]. Измерения поляризационной модовой дисперсии выполнялись интерферометрическим методом комплектом SMF5000-PMD в составе широкополосного поляризованного источника и анализатора на основе интерферометра Майкельсона. Поляризационные характеристики обратного рассеяния этих оптических волокон осуществлялись с помощью лабораторного образца P-OTDR с длительностью зондирующего импульса 10 мкс. Полученные в результате обработки

рефлектограмм оценки поляризационной модовой дисперсии сопоставлялись с данными измерения интерферометрическим методом. Данные сравнения приведены в работе.

Также приведены результаты тестирования алгоритма по определению избыточной длины оптического волокна в кабеле. Методика тестирования базируется на испытаниях барабана с оптическим кабелем при воздействии термоциклов в климатической камере и основана на линейной зависимости избыточной длины волокна в кабеле от температуры [10]. В работе приведены экспериментальные данные, результаты обработки поляризационных характеристик и оценки погрешностей определения избыточной длины оптического волокна по предложенным алгоритмам.

Литература

1. De Prony G.R. *Essai expérimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'alkool, à différentes températures* - J. de l'École Polytech. V. 1(22), 1795. - P. 24–76.
2. Завьялов М. Н., Елизаров Д. В. Комбинированный вариант гармонического разложения Прони - Журн. СВУ. Сер. Матем. и физ., т.1(4), 2008. – с.443–452
3. Мясникова Н. В., Дудкин В. А. Использование метода Прони для анализа сейсмических сигналов идущего человека - Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Т.12(4), 2009. – С. 111–119.
4. Verstakov E. V. Algorithm of estimation of parameters of approximation for 2-D signals using Prony method -. 2010 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology.", 2010. – p.1265 - 1266.
5. Митрофанов Г., Прийменко В. Основы и приложения метода Прони-фильтрации - Технологии сейсморазведки, № 3, 2011. - с. 93–108.
6. Nigmatullin R. R., Zhang, W., Striccoli, D. General theory of experiment containing reproducible data: The reduction to an ideal experiment - Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 27(1-3), 2015. – p. 175–192.
7. Nigmatullin R. R., Maione, G., Lino, P., Saponaro, F., Zhang, W. The general theory of the Quasi-reproducible experiments: How to describe the measured data of complex systems? - Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 42, 2017. – p. 324–341.
8. Ribeiro M., Ewins D., Robb D. Non-stationary analysis and noise filtering using a technique extended from the original Prony method - Mechanical Systems and Signal Processing, V. 17(3), 2003. - P. 533–549.
9. Бурдин В.А. Дашков М.В., Ромодин А.В. Апробация метода измерения ПМД на действующей ВОЛП - Труды НТОРЭС. Научная сессия, посвященная дню радио, вып. LXII-2(2), 2007.
10. Burdin V.A., Vazhdaev M.A. Method of excess fiber length estimating based on low subzero temperature climatic test - SPIE Proceedings, V. 9156, 2014. – p.91560P.

РАБОТА КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ЛОКАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОЛОКНО

^{1,2}Бенгальский Д.М., ^{1,3}Харасов Д.Р., ^{1,2}Фомиряков Э.А., ¹Никитин С.П., ^{1,2}Наний О.Е.,
¹Трешиков В.Н.

¹ООО «Т8 Сенсор», г. Москва;

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

THE PERFORMANCE OF A COHERENT REFLECTOMETER UNDER CONDITIONS OF STRONG LOCAL EXPOSURE TO FIBER

Bengalski D.M., Kharasov D.R., Fomiryakov E.A., Nikitin S.P., Nanyi O.E., Treshchikov V.N.

Аннотация

В данной работе экспериментально и теоретически исследовано влияние внешнего механического периодического воздействия как на зондирующие импульсы когерентного рефлектометра, так и на регистрируемый им сигнал рэлеевского обратного рассеяния. В качестве источника внешнего воздействия использовался пьезоволоконный модулятор. Показано, что достаточно сильное локальное внешнее воздействие искажает рефлектограмму принимаемую со всей части волокна, расположенной за местом сильного воздействия.

Когерентные фазочувствительные рэлеевские рефлектометры (фОТDR) находят применение в качестве распределенных датчиков деформации, давления, температуры [1,2]. В фОТDR в качестве распределённого датчика используется оптическое волокно, которое периодически зондируется оптическими импульсами, и затем анализируется сигнал обратного рассеяния. В работе [3] на примере распространения продольного виброакустического возмущения в волокне, показано наличие дополнительного случайного нелинейного отклика в сигнале рефлектометра, который приводит к ухудшению чувствительности фОТDR. Ранее считалось, что локальное воздействие не сказывается на работе фОТDR вне области локального воздействия. Однако в данной работе показано, что это не всегда так.

Схема экспериментальной установки показана на Рисунок 1. В эксперименте использовался фОТDR «Дунай», работающий по принципу двухимпульсной схемы [2]: волокно с частотой $f_p = 1$ кГц зондировалось последовательностями из 4 пар импульсов с разностью фаз $[0, \pi/2, \pi, 3\pi/2]$ длительностью $\tau_p = 200$, расстоянием между ними $\tau_d = 300$ нс, что позволяет восстановить разность фаз в рефлектограмме во всех точках волокна. Для детерминированного внешнего воздействия на волокно использовался пьезоволоконный модулятор (PZT), на который с помощью генератора сигналов (SG) подавалось синусоидальное напряжение $U(t)$ на частоте $f_{gen} = 12001$ Гц и с амплитудой $U_0 = 5$ В. Для измерения спектра зондирующего импульса в обычную схему рефлектометра был добавлен интерферометр Маха-Цандера (MZI) с волоконной линией задержки на выходе которого регистрировался сигнал биений с опорным излучением лазера находящегося в фОТDR. Для анализа спектра биений использовался фотоприёмник Alphalas UPD-15-IR2 (PD) и анализатор спектра и сигналов Rohde & Schwarz FSW8 (ESA).

Изменение фазы излучения φ_{mod} на выходе PZT пропорционально растяжению волокна ΔL , которое в свою очередь пропорционально напряжению, подаваемому на PZT $U(t)$, то есть $\varphi_{mod}(t) = K(f_{gen}) \cdot U(t)$, где $K(f_{gen})$ – коэффициент пропорциональности между $U(t)$ и φ_{mod} , который зависит от f_{gen} , материала, геометрии пьезоэлемента и способа крепления волокна

к нему. В случае когда к модулятору приложено напряжение $U(t) = U_0 \sin(2\pi f_{gen} t)$, его работа приводит к периодическому изменению мгновенной частоты излучения $\Delta\omega(t) = \varphi_{mod}'(t) = \Delta\omega_0 \cdot \cos(2\pi f_{gen} t)$, где $\Delta\omega_0 = K(f_{gen}) \cdot U_0 \cdot 2\pi f_{gen}$. Для импульсов длительностью много меньше, чем период воздействия ($2\pi f_{gen} \tau_p \ll 1$) будет наблюдаться сдвиг центральной частоты. В [4] показано, что при изменении центральной частоты прямоугольного зондирующего импульса на величину $1/\tau_p$, сигнал обратного рэлеевского рассеяния (рефлектограмма) полностью декоррелируется, что недопустимо для корректной работы фOTDR.

С помощью MZI была измерена спектрограмма зондирующих импульсов на выходе из волоконной линии с включенным PZT (см. рис. 2). Из-за стробоскопического эффекта центральная частота регистрируемых зондирующих импульсов осциллировала на частоте $f_{mod} = 1$ Гц (равной остатку от деления f_{gen} на частоту f_p) и амплитудой 5,5 МГц большей чем $1/\tau_p = 5$ МГц что полностью нарушает нормальную работу рефлектометра. Из спектрограммы был также определён коэффициент $K(f_{gen}) = 14$ рад/В на частоте $f_{gen} \sim 12$ кГц. На рис. 3 показан водопад восстановленной фазы на участке волокно с PZT. Сигнал модулятора виден на расстоянии $\sim 1050 - 1100$ м. В случае, когда $K(f_{gen}) \cdot U_0 > 2\pi$, фазовый отклик от PZT имеет нелинейный вид. После 1100 м, за областью расположения модулятора, на водопаде заметны дополнительные фазовые набег в виде повторяющихся горизонтальных полос с частотой f_{mod} . Моделирование рефлектограмм с изменяющейся частотой лазера на основе модели изложенной в [4] показало аналогичные результаты (см. рис. 4).

Таким образом, экспериментально и теоретически показано влияние локального внешнего воздействия на спектральный состав зондирующего импульса, что негативно сказывается на работу когерентного рефлектометра в виде дополнительных фазовых набегов на водопаде за областью воздействия.

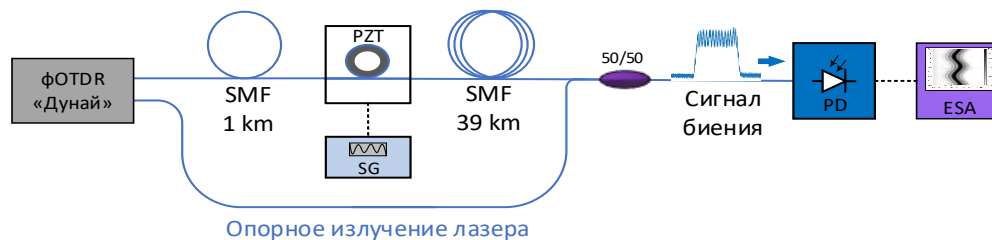


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

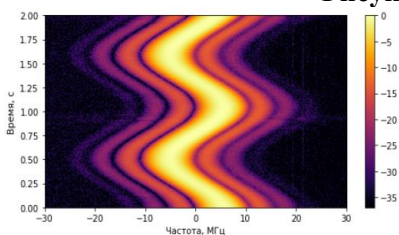


Рисунок 2. Спектрограмма измеренного сигнала биений (в дБ) излучения лазера с зондирующими импульсами на выходе волокна с PZT.

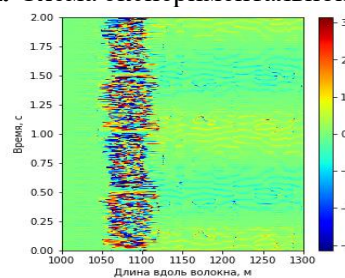


Рисунок 3. Экспериментальный водопад разностной фазы (в рад). Пьезоволоконный модулятор установлен на расстоянии 1050 м.

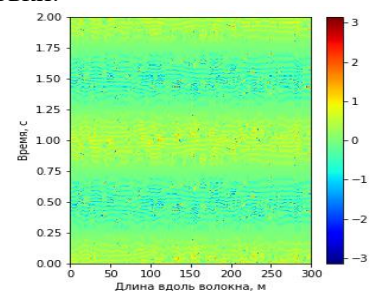


Рисунок 4. Смоделированный водопад разностной фазы (в рад).

Литература

1. Shatalin, Sergey V., Vladimir N. Treschikov, and Alan J. Rogers. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing. *Applied optics* 37.24 (1998): 5600-5604.

2. Nikitin, S. P., et al. Distributed temperature sensor based on a phase-sensitive optical time-domain Rayleigh reflectometer. *Laser Physics* 28.8 (2018): 085107.
3. Alekseev, A. E., B. G. Gorshkov, and V. T. Potapov. Fidelity of the dual-pulse phase-OTDR response to spatially distributed external perturbation. *Laser Physics* 29.5 (2019): 055106.
4. Mermelstein, Marc D., et al. Rayleigh scattering optical frequency correlation in a single-mode optical fiber. *Optics letters* 26.2 (2001): 58-60.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНО-ФОТОННОГО ИНТЕРРОГАТОРА НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ВОЛНОВОДНОЙ РЕШЕТКИ

¹Казаков И.А., ^{1,2}Конторов С.М., ¹Шипулин А.В., ¹Кюпперс Ф.

¹Сколковский институт науки и технологий, г. Москва;

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

DEVELOPMENT OF AN INTEGRAL-PHOTON INTERROGATOR BASED ON A DIFFRACTION WAVEGUIDE GRATING

Kazakov I.A., Kontorov S.M., Shipulin A.V., Küppers F.

Аннотация

Произведено численное моделирование интеррогатора на основе дифракционной волноводной решетки (ДВР) на фотонной интегральной схеме (ФИС). Моделирование произведено как на уровне отдельных компонентов, так и на системном уровне. Оценено влияние основных параметров ДВР, а именно перекрытие каналов и их ширина, на чувствительность интеррогатора. Результаты выявили неравномерную чувствительность прибора при изменении центральной длины волны волоконной Брэгговской решетки. Получены оптимальные параметры ДВР для использования её в качестве спектрально-чувствительного элемента интеррогатора, а также разработаны маски для изготовления ДВР в структуре кремний-на-изоляторе (КНИ).

Существующие интеррогаторы на основе дискретных компонентов обладают рядом недостатков, которые могут быть устранены с помощью применения технологий интегральной фотоники [1]. В последние годы фотонные интегральные схемы становятся все более популярны для различных применений, так как позволяют существенно уменьшить размеры системы, улучшить температурную и механическую стабильность, уменьшить энергопотребление и конечную стоимость. Интеррогатор, построенный на основе пассивной дифракционной волноводной решетки [2], позволяет отказаться от применения технически сложных и дорогостоящих высокоскоростных элементов, сохраняя при этом технологическую простоту изготовления и частоту опроса, ограниченную только характеристиками детектора и электроники.

Поскольку ДВР обычно используется как устройство для разделения/суммирования спектральных компонент телекоммуникационных сигналов, её каналы должны быть хорошо изолированы (более 25 дБ). С другой стороны, в данной работе для использования ДВР в качестве интеррогатора, необходимо максимальное перекрытие каналов, так как точность измерения центральной длины волны ВБР определяется из соотношения интенсивностей в каналах, между которыми она расположена. Очевидно, что увеличение перекрытия соседних каналов приведет к повышению точности работы прибора, но в то же время уменьшит рабочий диапазон длин волн. Следовательно, для корректной работы интеррогатора во всем диапазоне длин волн, необходимо найти максимальное спектральное разделение соседних каналов решетки, при котором точность определения центральной длины волны ВБР не превышает 50 пм, что соответствует разрешению коммерчески доступных приборов. В данной работе, количественно определяется данное спектральное

разделение, а затем моделируется на компонентном уровне с последующим получением маски, необходимой для изготовления ДВР на платформе КНИ.

Моделирование интеррогатора на системном уровне производилось с помощью ПО Synopsys OptSim Circuit. Схема интеррогатора изображена на рисунке 1. В данной схеме используется источник белого света, ВБР, ДВГ и p-i-n детектор, с параметрами, приближенными к реальным.

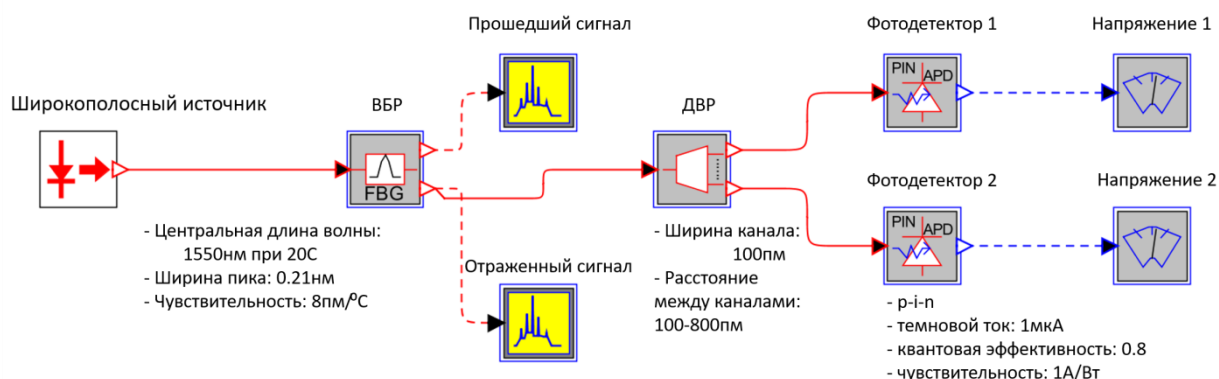


Рисунок 4. Блок-схема интеррогатора, используемого для расчетов в ПО Synopsys OptSim Circuit.

Произведено сканирование в температурном диапазоне от 0 до 140°C с шагом в 1°C. Для каждого значения температуры измерена длина волны ВБР, электрические мощности на фотодетекторах и их стандартные отклонения. Исходя из полученных данных определена точность работы прибора в зависимости от центральной длины волны ВБР. Описанные измерения произведены для различных расстояний между каналами: от 800 пм до 100 пм с шагом в 100 пм.

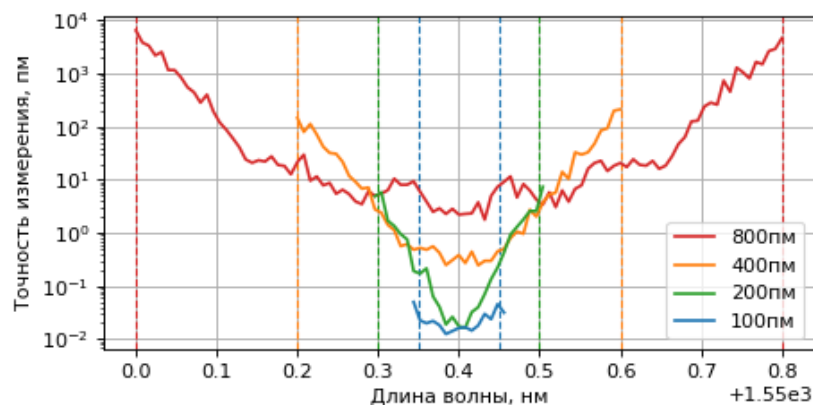


Рисунок 5. Зависимость точности измерения длины волны ВБР, от длины волны ВБР. Пунктирными линиями обозначены положения центров каналов ДВР; различными цветами обозначены измерения для различных спектральных разделений каналов ДВР.

На рисунке 2 изображена зависимость точности определения длины волны ВБР от ее центральной длины волны, каналы ДВР обозначены пунктиром. Очевидна неравномерная зависимость чувствительности интеррогатора от центральной длины волны ВБР: ошибка определения длины волны увеличивается при приближении к центру канала ДВГ. При расстояниях между каналами больше 200 пм становится невозможной работа интеррогатора с требуемыми параметрами во всем диапазоне длин волн, так как максимальная ошибка измерений становится больше 50 пм. Но остается возможной работа интеррогатора в некоторой области спектра между соседними каналами ДВР. Следует отметить, что данная зависимость будет верной и при масштабировании ширин и расстояний между каналами ДВР, а оптимальное отношение между шириной каналов ДВР и расстоянием между ними должно быть 1:1.

На основе проведенного моделирования конечно-разностным методом программного обеспечения Synopsys Rsoft были определены геометрические параметры, спектры каналов и получены маски ДВР для последующего изготовления на платформе кремний-на-изоляторе с толщиной слоя оксида 2 мкм и слоя оптического кремния 220 нм. Ширина канала ДВР при этом равнялась 400 нм, а расстояние между каналами 400 нм, что соответствует результатам моделирования на рис. 3. Данная ДВР имеет перекрытие соседних каналов на уровне 3 дБ, когда стандартная телекоммуникационная ДВР имеет перекрытие на уровне более 25 дБ.

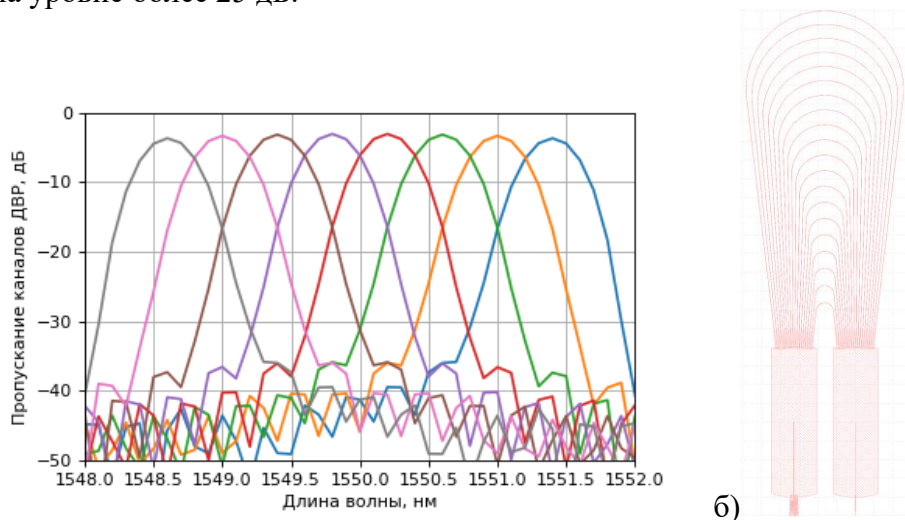


Рисунок 6. а) Спектр смоделированной ДВР с шириной канала 400 нм и расстоянием между соседними каналами 400 нм.; б) Маска этой ДВР.

В настоящее время на основе проведенного анализа изготавливаются полученные структуры с последующей интеграцией других компонентов на одной ФИС.

Литература

1. Marin Y. E. et al. Current status and future trends of photonic-integrated FBG interrogators // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Т. 36. – №. 4. – С. 946-953.
2. Evenblij R. S., Leijtens J. A. P. Space Gator: a giant leap for fiber optic sensing // *International Conference on Space Optics—ICSO 2014. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Т. 10563. – С. 105631A.*

FIELD TEST OF BROADBAND FIBER OPTIC INTERFEROMETRIC SEISMOMETER WITH MODULATION DEPTH FEEDBACK CONTROL

^{1,2}Zhang W.T., ^{1,2}Huang W.Z., ³Wang Y.B., ²Zhang J.X., ²Lv B., ³Yao Y., ^{1,2}Li F.

¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing (China);

² College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (China);

³ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (China)

Abstract

This paper proposed a broadband fiber optic interferometric seismometer based on frequency stabilization and modulation depth feedback control technique. A comparative test between the fiber optic seismometer and Smartsolo geophone using a controllable source vehicle was conducted in Baiyun Ebo mining area in Baotou, Inner Mongolia, China.

Experiment results show that the response frequency band reaches 0.1 Hz - 500 Hz with noise level better than $10 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10 Hz. The correlation coefficients of the recorded swept seismic waves are better than 0.99.

Nowadays, fiber optic seismometers are widely used in oil and gas resource exploration and seismic monitoring because of its ability to extreme environmental resistance and large-scale capability [1, 2]. However, due to the limit of the noise (especially in low frequency band) of the system light source, it is very difficult to realize an high resolution within a wide frequency range (especially below 1 Hz) for the interferometric fiber optic sensing system. Unfortunately, in the fields of seismic monitoring, the measured signals often have a very wide frequency range and have very rich information below 1 Hz.

In our previous report [3], a high-resolution broadband phase interrogation technique based on PDH frequency stabilization technique is proposed for an interferometric fiber optic sensor. But the carrier modulation depth is greatly affected by the arm length difference of each fiber-optic interference sensor and the modulation amplitude of laser light source frequency. This is also affected by the ambient temperature fluctuation and the stability of the modulation voltage. in order to ensure that the interferometric sensor has the best state of noise level and harmonic distortion, it is necessary to control the carrier modulation depth to a specific value.

This paper proposed a novel broadband fiber optic interferometric seismometer based on frequency stabilization technique and modulation depth feedback control. Firstly, the laser source (NKT E15, linewidth 100 Hz) is locked to an absolute frequency referencing (H13C14N absorption line) using Pound-Drever-Hall (PDH) technique to reduce the low-frequency noise level of the laser source, which can optimize the low-frequency performance of the system. Secondly, We have developed an algorithm for real-time calculation and feedback of modulation depth. The carrier modulation depth is calculated by reference [4] and controlled to be 2.63. A phase measurement sequence is recognized by PGC-Arctan demodulation algorithm. After processing in this way, the modulation depth of the system will no longer be affected by factors such as ambient temperature and laser frequency drift, and has high stability. As a experimental result, the response frequency band reaches 0.1 Hz - 500 Hz with noise level better than $10 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10 Hz, considering that the sensitivity of the seismometer is about 41 dB (re: 0 dB=1 rad/g) [5].

A comparative test between fiber optic seismometers and Smartsolo geophones (SG-5, 5 Hz) using a controllable source vehicle (Nomad-65) was conducted in Baiyun Ebo mining area in Baotou, Inner Mongolia, China. Fiber optic seismometers are installed in the holes and forming a 15 Meters spaced Array. A Smartsolo geophone is installed next to each fiber optic seismometer shown in figure 1(a). The recorded seismic waves at a distance of 45 meters (b) and 90 meters (c) from the controllable source vehicle are shown in figure 1(b) and figure 1(c). The correlation coefficients of the two comparative results are 0.9913 and 0.9901 respectively, which implies that the proposed system may be expected to be applied in broadband oil and gas exploration and seismic monitoring.

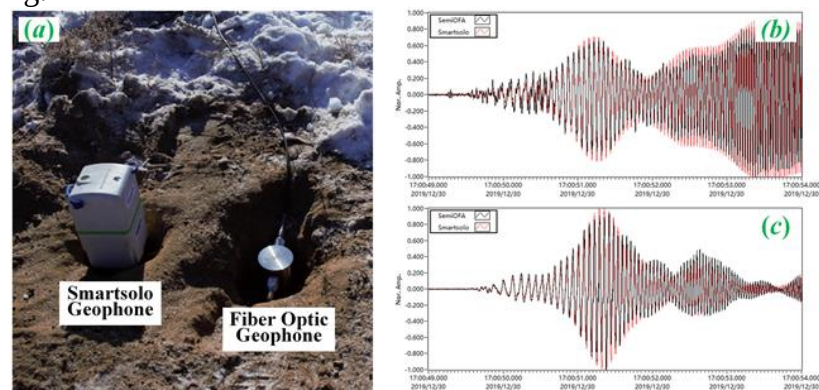


Figure 1. Field test site (a), the field test results with simple (b), comparison of the recorded seismic waves at a distance of 45 meters (b) and 90 meters (c).

References

1. Keul, P. R., Mastin, E., Blanco, J., Maguerez, M., Bostick, T., Knudsen, S. (2005). Using a fiber-optic seismic array for well monitoring. *The Leading Edge*, 24(1), 68-70. <https://doi.org/10.1190/1.1859704>.
2. Lindsey, N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Freifeld, B., Cole, S., James, S. R., Ajo-Franklin, J. B. (2017). Fiber-optic network observations of earthquake wavefields. *Geophysical Research Letters*, 44(23), 11-792. <http://dx.doi.org/10.1002/2017GL075722>.
3. Huang, W. Z., Zhang, W. T., Li, F. (2019). High-resolution broadband phase interrogation for fiber optic interferometer using frequency stabilization and PGC demodulation technique. In *17th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCON2018)*, 11048, 1104844. <https://doi.org/10.1117/12.2520915>.
4. Anton, V. V., Mikhail, Y. P., Mikhail, V. M., George P. M., Artem S. A. (2017). Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 17(13), 4143-4150. [10.1109/JSEN.2017.2704287](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287).
5. Jiang, D. S., Zhang, W. T., Li, F. (2013). All-Metal optical fiber accelerometer with low-transverse sensitivity for seismic monitoring. *IEEE Sensors Journal*. 13, 4556-4560. [10.1109/JSEN.2013.2270554](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2270554).

RESEARCH ON TEMPERATURE COMPENSATION OF ULTRA-HIGH-RESOLUTION FBG STATIC STRAIN SENSOR IN CRUSTAL DEFORMATION OBSERVATION

^{1,2}Huang W.Z., ^{1,2}Zhang W.T., ^{1,2}Li F.

¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing (China);

² College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (China)

Abstract

Due to the temperature sensitivity difference between the sensing FBG and the reference FBG, there is inaccuracy in the crustal deformation measurement under temperature fluctuations. This paper proposed a high-resolution temperature compensation technique by measuring the effective cavity length of two FBG resonators, which can improve the static strain measurement resolution and reduce the long-term drift of the system. Field test shows that a temperature compensation accuracy of 0.2 mK and a static strain measurement resolution of 1.45 nε can be achieved.

Over the past two decades, fiber Bragg grating (FBG) and FBG based Fabry-Perot resonator (FBG-FP) are widely used for high-resolution static strain measurement in crustal deformation observation, which shows many advantages owing to their capability of real-time, in situ, sensitive temperature measurement with low cost, small size, fast response and immunity to electromagnetic interference [1 - 3]. An additional reference FBG or FBG-FP, acting as the compensating element of the laser frequency instability and environment temperature fluctuation, is usually used in those systems.

For nano strain-level high-resolution FBG-FP measurement system, the accuracy of temperature compensation determines the static strain measurement resolution and the long-term drift of the system. However, due to the differences of manufacturing process and cavity length of FBG-FPs, the temperature sensitivity between the sensing FBG and the reference FBG are slightly different. The measurement system will have a large long-term drift, which will also affect the

static strain measurement resolution of the system, when the ambient temperature fluctuates. Therefore, for the ultra-high-resolution static strain measurement system at the nano strain level, the temperature compensation problem of FBG-FPs is worth studying. But it has not attracted enough attention.

Recently, we have found that the free spectral range of a FBG-FP can be used for high-resolution temperature measurement with a narrow linewidth tunable fiber laser [4]. According to the reference [5], the effective cavity length (L_{eff}) of a high-reflectivity FBG resonator is determined by the group delay of the grating, which depends on its diffraction efficiency and the physical length. The variation of L_{eff} is mainly determined by the refractive index modulation depth (Δn) which is related to the temperature and strain of the FBG. Then we can get that the efficient cavity length and the variation of FSR is mainly determined by L_{eff} . So the value of FSR, also related to the temperature and strain, can be used for temperature and strain sensing. Therefore, by using a sensing FBG-FP and a reference FBG-FP, the temperature compensation problem of the high-resolution static strain sensing system can be studied.

The principle of the proposed high-resolution temperature compensation technique is shown in figure 1(a). The proposed FBG-FP is formed by two high-reflectivity FBGs in one fiber. The parameters of the two FBGs are: nominal center wavelength 1537.100 nm, reflectivity 99.95%, 3 dB bandwidth 0.35 nm. By measuring the effective cavity length of the two FBG resonators, the static strain and ambient temperature can be sensed simultaneously. According to the reference [4], we use a standard platinum resistance thermometer resistance thermometer to calibrate the temperature sensitivity of the two FBG-FPs. As a result, the temperature sensitivities of the FBG-FPs are 3.89 pm/K and 3.94 pm/K. The strain sensitivity of the sensing FBG-FP is 0.56 pm/ $\mu\epsilon$. The wavelength resolution of the demodulation system is 0.81×10^{-3} pm. The effect of this slight temperature sensitivity difference will be eliminated through the back-end compensation algorithm, which can reduce the long-term drift of the system, shown in figure 1 (c). Field test, in Jinzhai seismic station of Anhui province, china, shows that a temperature compensation accuracy of 0.2 mk and a static strain measurement resolution of 1.45 n ϵ can be achieved.

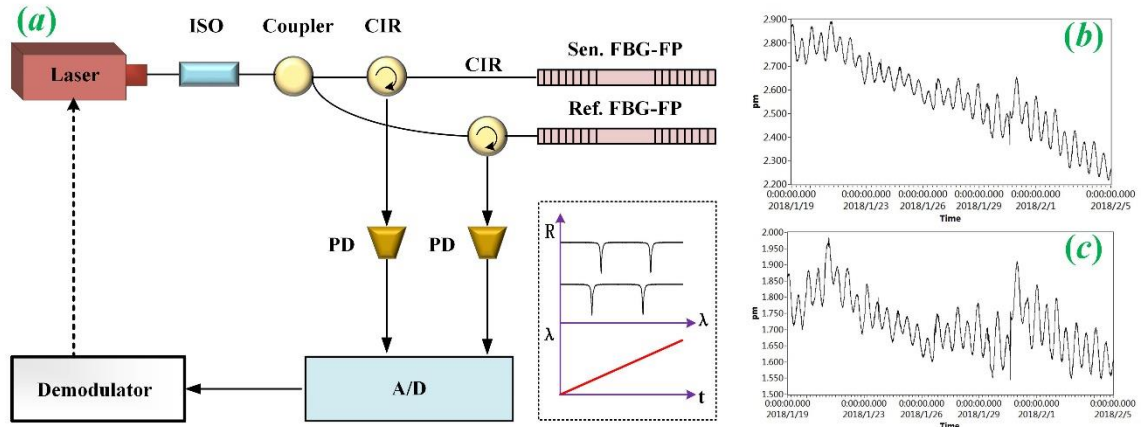


Figure 1. The principle of the proposed high-resolution temperature compensation technique (a), the field test results with simple (b) and accurate (c) temperature compensation.

Reference

1. Gagliardi, G., Salza, M., Avino S., Ferraro, P., Natale, P. D. (2010). Probing the ultimate limit of fiber-optic strain sensing. *Science*, 330(19), 1081-1084. DOI: 10.1126/science.1195818.
2. Huang, W. Z., Zhang, W. T., Li, F. (2015). Swept optical SSB-SC modulation technique for high-resolution large dynamic range static strain measurement using FBG-FP sensors, *Optics Letters*, 40(7), 1406-1409. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001406>.
3. Liu, Q. W., He, Z. Y., Tohunaga T. (2015). Sensing the earth crustal deformation with nano-strain resolution fiber-optic sensors. *Optics Express*, 23(11), A428-A436. <https://doi.org/10.1364/OE.23.00A428>.

4. Huang, W. Z., Zhang, W. T., Li, F. (2018). Fiber Bragg grating resonator for ultrahigh-resolution temperature sensing based on efficient cavity length, in 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), TuE94. <https://doi.org/10.1364/OFS.2018.TuE94>.
5. Yuri, O. B., Dobryna, Z., Salvador, T. P., Jose, L. C., Miguel, V. A. (2006). Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings, *Optics Express*, 14(14), 6394-6399. <https://doi.org/10.1364/OE.14.006394>.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЁННОГО КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ВОЛОКОННОГО ДОЗИМЕТРА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

Трегубов А.В., Приходько В.В., Алексеев А.С., Жуков А.В.

Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы, г.Ульяновск

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE MODEL OF A DISTRIBUTED CALORIMETRIC FIBER DOSIMETER BASED ON THE EFFECT OF STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING

Tregubov A.V., Prikhodko V.V., Alekseev A.C., Zhukov A.V.

Аннотация

Приведены результаты исследования предложенной авторами ранее концепции распределённого calorиметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштам-Бриллюэна (ВРМБ). Конструкция сенсора представляет собой один или множество термоизолированных сферических чувствительных элементов из материала с высоким коэффициентом ослабления гамма-излучения, закрепленных с фиксированным шагом на оптическом волокне. Контроль изменения температуры сенсора вследствие взаимодействия с ионизирующим излучением осуществляется с помощью анализатора ВРМБ, что позволяет проводить измерение температуры на всем протяжении оптического волокна на расстояниях до нескольких десятков километров. Приводятся результаты модельных расчетов эффективности сферических сенсорных элементов, изготовленных из различных материалов. Выполнена оценка чувствительности предлагаемого дозиметра, и проанализированы результаты предварительного эксперимента по взаимодействию сенсора с гамма-излучением.

Введение

На сегодняшний день активно ведутся исследования в области разработки волоконных дозиметрических сенсоров, которые по сравнению с классическими решениями (полупроводниковыми, сцинтилляционными сенсорами, ионизационными камерами) обладают рядом преимуществ: не требуют электрического питания [1, 2, 3, 4]; имеют высокую электромагнитную помехозащищенность [3, 4]; возможность удаленного мониторинга и мультиплексирования [3, 4]; радиационную стойкость [5]. Описанные в литературе волоконные дозиметрические системы можно разделить, в зависимости от используемого физического эффекта, на сцинтилляционные [6] (на основе сцинтилляционных волокон, на основе неорганических сцинтилляционных материалов сенсоров, позиционно-чувствительные «time-of-flight»), сенсоры на основе эффекта Вавилова-Черенкова.

В физике элементарных частиц известен калориметрический метод [7], основанный на преобразовании поглощенной веществом сенсора энергии падающих частиц в другой, поддающийся измерению, физический параметр – количество теплоты, выделенное при взаимодействии и характеризующееся температурой тела сенсора [8]. Преимуществом калориметрических дозиметров является независимость от энергии частиц, простота конструкции и надежность.

Ранее авторами предложена концепция распределенного калориметрического дозиметра и проанализирована эффективность сенсорных элементов различной геометрической формы [9]. К преимуществам такого подхода относится возможность разработки распределенного волоконного дозиметра с использованием всего лишь одной протяженной волоконной линии. Для регистрации температуры вдоль оптического волокна предложено использовать анализатор на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), которые давно зарекомендовали себя как высокочувствительные сенсоры температуры и деформации [10]. Подобный тип распределенного дозиметра в литературе не отражен.

В настоящей работе приводятся результаты дальнейшего исследования эффективности концепции волоконного сенсора температуры для регистрации мощности дозы ионизирующего излучения с использованием модельных расчетов и эксперимента.

Материалы и методы

Авторами предложена следующая конструкция сенсора: сферические чувствительные элементы из материала с высоким коэффициентом ослабления гамма-излучения устанавливаются на оптическое волокно с необходимым интервалом. Для снижения тепловых потерь чувствительные элементы сенсора размещаются в теплоизолирующих кожухах из высоко-прозрачного для гамма-квантов материала. Сенсорный элемент имеет центральное сквозное отверстие с диаметром, превышающим диаметр оптического волокна и рассечен полуплоскостью, край которой совпадает с его осью вращения. Монтаж сенсора осуществляется его обжатием на оптическом волокне и фиксацией при помощи теплопроводящего эластичного клеящего состава.

Подобная конструкция дает возможность создания датчиков, которые содержат сенсорные элементы, распределенные по всей длине волокна, позволяя проводить измерения мощности дозы радиационного излучения вдоль траекторий протяженностью до нескольких десятков километров.

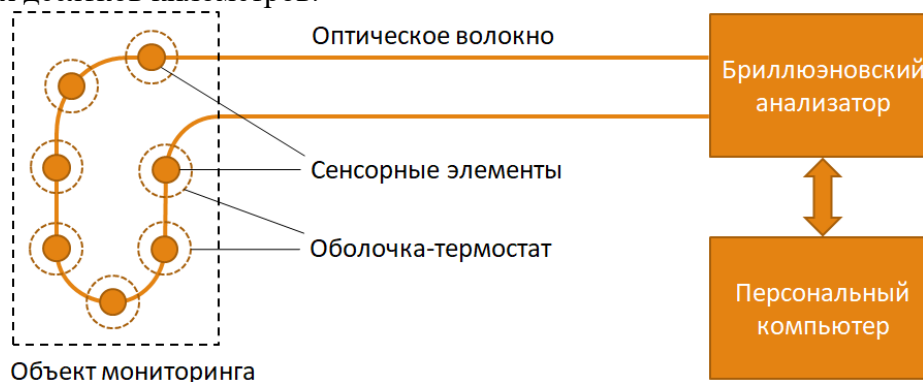


Рисунок 1. Структурная схема калориметрического волоконного дозиметра.

Проведенное на данной конструкции исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенная концепция распределенного калориметрического дозиметра показала свою эффективность на практике и представляется перспективной для дальнейшего изучения;
2. Наиболее эффективным материалом для сенсорных элементов из проанализированных является свинец, несмотря на худшие показатели теплопроводности;

3. Использование термопар вносит заметный вклад (до десятков процентов) в температурную зависимость сенсора от мощности дозы, причем эффект наиболее заметен для образцов с малой массой. Данный эффект обусловлен потерями тепла через компенсационные кабели. Использование оптоволокна в силу меньшей площади контакта сенсорных элементов с волокном и значительно меньшей теплопроводности позволит избежать дополнительных тепловых потерь.

Финансирование:

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области (грант 18-48-730038).

Литература

1. Beierholm Anders Ravnsborg. Pulse-resolved radiotherapy dosimetry using fiber-coupled organic scintillators : Ph. D. thesis / Anders Ravnsborg Beierholm. — Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi, 2011.
2. Beierholm A.R., Lindvold Lars, Andersen Claus. Organic scintillators with long luminescent lifetimes for radiotherapy dosimetry // Radiation Measurements - RADIAT MEAS. — 2011. — 12. — Vol. 46.
3. Carrasco P., Jornet N., Jordi O. et al. Characterization of the Exradin W1 scintillator for use in radiotherapy. // Medical physics. — 2015. — Jan. — Vol. 42. — P. 297–304.
4. O'Keeffe S., McCarthy D., Woulfe P. A review of recent advances in optical fibre sensors for in vivo dosimetry during radiotherapy. // The British journal of radiology. — June. — 2015. — Vol. 88. — P. 20140702.
5. Beddar A.S. Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy // Radiation Measurements. — 2006. — Vol. 41. — P. S124 – S133. — The 2nd Summer School on Solid State Dosimetry: Concepts and Trends in Medical Dosimetry. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448707000108>.
6. Tregubov A.V., Svetukhin V.V., Berintsev A.M., Prihodko V.V., Fomin A.N., Muralev A.B., Markov D.V. System for monitoring the state of spent nuclear fuel dry storage facility // Automation of control processes. — 2017 — # 2 (48) — P.62-71.
7. ГОСТ 26307-84. Источники гамма-излучения радионуклидные закрытые. Методы измерения параметров (с Изменением N 1).
8. Fabjan Christian Wolfgang, Gianotti F. Calorimetry for Particle Physics // Rev. Mod. Phys. — 2003. — Oct. — T. 75, № CERN-EP-2003-075. — C. 1243–1286. 96 p. — URL: <https://cds.cern.ch/record/692252>.
9. Алексеев А.С., Приходько В.В., Трегулов А.В. Волоконные калориметрические сенсоры для дозиметрии // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 344-345.
10. Tregubov A.V., Svetukhin V.V., Prihodko V.V., Novikov S.G., Berintsev A.V. A novel fiber optic distributed temperature and strain sensor for building applications // Results in Physics. Volume 6, 2016, Pages 131-132.