

Радиофизика

Научная статья

УДК 681.785.57

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18414>

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

З. А. Еровенко¹, А. А. Маркварт¹, А. В. Петров¹,
М. А. Бисярин², Л. Б. Лиокумович¹, Н. А. Ушаков¹ □

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
□ n.ushakoff@spbstu.ru

Аннотация. В работе представлен нетрадиционный подход к обработке интерференционных сигналов оптической когерентной томографии (ОКТ), позволяющий добиться кратного улучшения ее продольной пространственной разрешающей способности. Предложенный метод основан на использовании алгоритма спектральной оценки root-MUSIC. Определены параметры этого алгоритма, которые обеспечивают нахождение координат отражателей внутри исследуемого образца. В ходе проведенных теоретических и численных оценок определены и сформулированы требования к обеспечению сверхразрешения алгоритмом root-MUSIC. Проверка эффективности предложенного метода проведена путем измерения геометрических параметров поперечных сечений многомодовых и одномодовых оптических волокон. Экспериментальные результаты подтвердили многократное улучшение пространственной разрешающей способности ОКТ.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, оптическая когерентная томография, root-MUSIC, сверхразрешение, параметрическая оценка спектра

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10095, <https://rscf.ru/project/23-72-10095/>.

Для цитирования: Еровенко З. А., Маркварт А. А., Петров А. В., Бисярин М. А., Лиокумович Л. Б., Ушаков Н. А. Неразрушающий контроль оптических волокон с помощью оптической когерентной томографии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 4. С. 190–205. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18414>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18414>

NONDESTRUCTIVE TESTING OF OPTICAL FIBERS USING THE OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

Z. A. Erovenko¹, A. A. Markvart¹, A. V. Petrov¹,
M. A. Bisyarin², L. B. Liokumovich¹, N. A. Ushakov¹ □

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

□ n.ushakoff@spbstu.ru

Abstract. The paper presents a nonconventional approach to processing the interference signals of the optical coherence tomography (OCT) that allows for multiple improvements of the longitudinal spatial resolution of an image obtained. This technique is based on using the root-MUSIC spectral estimation algorithm. The parameters of this algorithm ensuring the



accurate determination of the reflector coordinates within a sample have been found. In the course of the theoretical and numerical assessments carried out, the requirements for providing the superresolution by the root-MUSIC algorithm were defined and formulated. In order to evaluate the effectiveness of the proposed method experimentally, the cross-section geometric parameters of multimode and single-mode optical fibers were measured. The obtained results confirmed the validity of the approach that was put forward.

Keywords: optical fiber sensor, optical coherence tomography, root-MUSIC, superresolution; parametric spectral estimation

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (grant No. 23-72-10095), <https://rscf.ru/project/23-72-10095/>.

For citation: Erovenko Z. A., Markvart A. A., Petrov A. V., Bisyarin M. A., Liokumovich L. B., Ushakov N. A., Nondestructive testing of optical fibers using the optical coherence tomography, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 190–205. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18414>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Развитие и повсеместное внедрение фотоники привело к революционным изменениям в различных областях науки и техники, например в инфокоммуникационных технологиях и системах связи, сенсорных технологиях для инспекции объектов энергетики и строительных сооружений, а также в медицинской диагностике. Оптическое волокно — это неотъемлемая часть современной инфраструктуры, которая служит как средой передачи информации, так и чувствительным элементом различных датчиков. Наряду с прогрессом фотоники, возникла необходимость располагать возможностью неразрушающего контроля компонентов волоконно-оптических систем, для того чтобы осуществлять их диагностику и поддерживать их работоспособность; указанные системы включают оптические волокна в составных волоконно-оптических трактах, а также волноводы в фотонных интегральных схемах.

В качестве средств диагностики различных оптических волноведущих сред часто применяются оптические рефлектометры [1], однако они позволяют локализовать грубые дефекты [2] и не позволяют визуализировать дефект, тем более — заданную область волокна, например соединение двух волокон. Методы диагностики преформ [3, 4] имеют относительно низкую пространственную разрешающую способность и непригодны для диагностики оптических волокон без существенной доработки. Современные волоконно-оптические сварочные аппараты дают возможность визуализации места сварки лишь после нее, однако наблюдаемое изображение часто носит качественный характер и не содержит достаточного объема информации для интерпретации результата в случае соединения волокон разного типа.

Детальная визуализация места сварки различных волокон представляет собой довольно актуальную задачу при разработке волоконно-оптических датчиков на основе межмодовых интерферометров. При этом для такой визуализации целесообразно использовать методы фотоники, ввиду их возможности интегрирования непосредственно в производственный процесс и отсутствия необратимого воздействия на исследуемый объект.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) [5] — это один из передовых инструментов исследования различных материалов и прозрачных объектов, который позволяет получать их трехмерные изображения. ОКТ-паттерны создаются на основе так называемых *A*-сканов, которые отображают распределения коэффициента отражения и рассеяния падающего лазерного излучения по глубине образца. По результатам перемещения зондирующего светового пучка по поверхности образца и объединения полученных при этом *A*-сканов, соответствующих различным продольным сечениям образца, формируют двух- и трехмерные изображения (*B*- и *C*-сканы). В последнее время наиболее широко

распространен спектральный вариант ОКТ: в этом случае *A*-сканы рассчитываются как дискретное преобразование Фурье от спектральных интерференционных сигналов, получаемых при интерференции света опорной волны с рассеянным и отраженным светом внутри образца.

Основным применением ОКТ в настоящее время стала биомедицинская диагностика, которая включает такие направления, как офтальмология, эндоскопическая визуализация, определение характеристик тканей и другие [6]. Также в ряде работ сообщалось о применении данного метода для контроля оптических систем [7], тестирования полупроводниковых приборов [8], мониторинга процесса аддитивного производства [9]. Известно об использовании ОКТ для измерения диаметра сердцевины многомодовых оптических волокон [10], которое зачастую выполняется другими способами [11, 12].

Как и у любого устройства визуализации, пространственная разрешающая способность δz есть крайне значимый параметр для ОКТ-системы. Поскольку в ОКТ-системах продольная (в направлении распространения зондирующего пучка) и поперечная (перпендикулярная указанному направлению) компоненты пространственной разрешающей способности определяются разными факторами, они могут существенно различаться, как неодинаковы и методы их улучшения. В спектральной ОКТ продольная компонента зависит от ширины спектрального диапазона $\Delta\lambda$, в котором выполняется измерение интерференционного сигнала [13]. Связь продольной разрешающей способности с параметрами спектрального диапазона, в котором измеряется интерференционный сигнал, описывается выражением

$$\Delta z = m(\lambda_0)^2/(2\Delta\lambda), \quad (1)$$

где λ_0 – центральная длина волны используемого спектрального диапазона; m – коэффициент пропорциональности, который зависит от формы спектра источника излучения (обычно $m \approx 1$).

Стандартные телекоммуникационные оптоэлектронные компоненты наиболее распространены и доступны для реализации оптических измерительных систем, которые работают в спектральных диапазонах с центральными длинами волн 1,30 и 1,55 мкм. Типовые перестраиваемые лазеры и суперлюминесцентные диоды, работающие в указанных диапазонах, обеспечивают ширину спектрального диапазона $\Delta\lambda$ до 80 – 100 нм. Если принять во внимание формулу (1), то результирующая продольная пространственная разрешающая способность таких ОКТ-систем может лежать в интервале от 8,5 до 15 мкм. В то же время для таких задач, как неразрушающий контроль волоконно-оптических компонентов и фотонных интегральных схем, требования по пространственной разрешающей способности составляют единицы микрометров и менее.

Однако улучшить разрешение за счет простого увеличения ширины спектрального диапазона $\Delta\lambda$ невозможно, поскольку свойства доступных оптических источников и влияние хроматической дисперсии материала накладывают определенные ограничения на эту ширину [13, 14].

Формирование *A*-скана эквивалентно задаче оценки спектра полигармонического сигнала. Следовательно, различные методы, такие как MUSIC и ESPRIT, известные своей способностью обеспечивать сверхразрешение [15 – 17], могут повысить качество ОКТ-изображений. Однако, как показано в статье [18], предлагаемое улучшение будет иметь некоторые фундаментальные ограничения, связанные с отношением сигнал/шум интерференционного сигнала.

В данной работе предлагается повышение продольной пространственной разрешающей способности спектральной ОКТ-системы путем усовершенствованной методики обработки сигналов.

Преимущество предлагаемого метода продемонстрировано через визуализацию сердцевин различных оптических волокон, в том числе одномодовых. Предлагаемый подход открывает путь к расширению применимости ОКТ в приложениях с высокими требованиями к пространственному разрешению, например, при визуализации клеточной структуры в биологии, при тестировании фотонных интегральных схем и во многих других (некоторые в настоящее время даже трудно предсказать).



Обработка интерференционных сигналов для получения улучшенной пространственной разрешающей способности

В данной работе использована следующая модель интерференционного сигнала. Исследуемый объект является прозрачным, в нем отсутствуют рассеивающие центры, расположенные по объему; свет внутри объекта отражается от N границ между слоями, различными по своим свойствам. Каждый j -й слой характеризуется показателем преломления n_j и толщиной L_j . При сложении волн когерентного излучения, отраженных внутри образца, имеет место интерференция света с опорной волной высокой интенсивности. Если предполагать, что отражения внутри образца – слабые, то интерференцией между целевыми волнами можно пренебречь.

Для описанной модели спектральный интерференционный сигнал можно записать в следующем виде:

$$S(\lambda) = I_0 + \sum_{i=1}^N I_i + 2 \sum_{i=1}^N \sqrt{I_0 I_i} \cos \left(2k \sum_{j=1}^i n_j L_j + \varphi_i \right), \quad (2)$$

где n_j , L_j – показатель преломления и толщина j -го слоя, соответственно; k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$; I_0 , I_i – величины интенсивности падающего света и отраженного от i -й границы; N – количество границ; φ_i – фазовый сдвиг волны, возникающий при отражении от i -й границы (при нормальном падении и диэлектрических поверхностях он равен 0 или π).

Необходимо учитывать, что величины I_i , n_i и φ_i могут зависеть от длины волны когерентного излучения λ .

Целью применения ОКТ в данном случае является оценка внутренней структуры исследуемого объекта, а именно – оптических расстояний $n_j L_j$. Как видно из формулы (2), задача формирования A -скана эквивалентна задаче оценки спектра полигармонического сигнала. Самый простой способ реализации такой оценки заключается в вычислении дискретного преобразования Фурье измеренного интерференционного сигнала S . Однако при этом продольная пространственная разрешающая способность ОКТ оказывается лимитированной классическими ограничениями, которые описываются формулой (1).

С другой стороны, в работах [19, 20] было показано, что такие методы спектральной оценки, как метод root-MUSIC, обеспечивают возможность достижения сверхразрешения [15, 16] и, следовательно, могут улучшать продольную пространственную разрешающую способность ОКТ. Также в статье [21] было показано, что погрешности оценки метода root-MUSIC могут приближаться к фундаментальной границе Рао – Крамера, что делает этот метод привлекательным для эффективной оценки оптических расстояний в ОКТ-изображениях.

Когда сигнал, описываемый формулой (2), рассматривается как функция длины волны света λ , пространственные частоты ω_i его интерференционных компонент связаны с разницей OPD_i оптических путей компонент следующим образом:

$$\omega_i = k_0^2 OPD_i / (2\pi), \quad (3)$$

где k_0 – центр диапазона волновых чисел, на котором измеряется спектральный интерференционный сигнал.

Следовательно, после оценки пространственных частот методом root-MUSIC разности оптических путей можно найти следующим образом:

$$OPD_i = L_i n_i = 2\pi \omega_i / k_0^2. \quad (4)$$

Важной частью алгоритма root-MUSIC является оценка количества сигнальных компонент целевого сигнала N , необходимая в случаях, когда это число неизвестно. Эта оценка обычно делается путем анализа собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы обрабатываемого сигнала с применением различных информационных критериев [22 – 24], а также эмпирических методов [17]. В результате такого анализа пространство собственных векторов можно разделить на два подпространства: сигнальное и шумовое. Для известной размерности сигнального подпространства N' , оно образуется собственными векторами, соответствующими наибольшим собственным значениям.

Однако на практике применения ОКТ-систем интерференционный сигнал может содержать некоторый уровень шума, способный повлиять на точность оценки количества сигнальных компонент. В связи с этим необходимо исследовать, как отличие количества сигнальных компонент N' , заданное в методе root-MUSIC, от истинного количества сигнальных компонент N , влияет на точность оценки частот сигнальных компонент.

С целью такого исследования был смоделирован набор полигармонических сигналов, для каждого из которых случайным образом были выбраны такие параметры, как количество сигнальных компонент N , их частоты f_i , амплитуды A_i и уровень аддитивного шума σ .

Для того чтобы не оставить без контроля сложность моделируемых сигналов, максимальное количество сигнальных компонент не превышало определенной заданной величины $N_{\max} = 20$. В каждом сгенерированном сигнале количество его компонент было принято случайной величиной с равномерным распределением от 1 до N_{\max} .

Частоты сигнальных компонент также считались случайными величинами с равномерным распределением от нуля до половины частоты дискретизации f_s ; амплитуды подчинялись логарифмически нормальному распределению с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 3$; стандартное отклонение аддитивного шума было принято случайной величиной с логарифмически равномерным распределением между значениями 10^{-7} и 10^{-4} . Количество отсчетов в моделируемых сигналах составило $M = 512$, что близко к практическим значениям. Полный набор состоял из 1 тыс. сигналов, каждый из которых характеризовался случайными параметрами.

Для определения погрешностей оценки частот сигнальных компонент методом root-MUSIC было необходимо сопоставить значения частот, найденных этим методом, с значениями частот сигнальных компонент. Если предположить, что отношение сигнал/шум (SNR) обрабатываемого сигнала имеет относительно высокое значение и, следовательно, ошибки нахождения частот сигнальных компонент относительно невелики, то задачу нахождения указанного соответствия можно сформулировать в довольно простой форме.

А именно, следует вычислить матрицу квадратов невязок ΔF_{ie} между истинными значениями частот f_i и их оценочными значениями f'_e :

$$\Delta F_{ie} = (f_i - f'_e)^2. \quad (5)$$

Столбцы матрицы (5) соответствуют истинным значениям, а ее строки – оценочным. К данной матрице мы применили венгерский алгоритм [25], благодаря чему были найдены позиции определенных элементов матрицы. Сумма этих элементов должна оказаться минимальной при условии, что из каждой строки и каждого столбца этой матрицы выбирается только один элемент. Поскольку все найденные элементы были взяты из уникальных строк и столбцов и тем самым общая ошибка была сведена к минимуму, искомое соответствие между моделируемыми сигнальными компонентами и оцененными частотами гарантированно является достаточно точным. Общая ошибка оценки частоты (сумма всех элементов матрицы, выбранных венгерским алгоритмом) была использована в качестве показателя качества работы алгоритма root-MUSIC при заданных условиях.

Метод root-MUSIC был использован для всех моделируемых сигналов, благодаря чему мы получали оценки частот их компонентов. При этом размерность сигнального пространства (служит важным параметром метода root-MUSIC), изменялась в диапазоне от 1 до $N_{\max} = 20$. Стоит уточнить, что количество компонент, частоты которых подвергались оценке, соответствовало размерности сигнального пространства и имело максимальное значение N_{\max} . На такой основе каждый сигнал обрабатывали алгоритмом root-MUSIC, в котором отклонение ΔN предполагаемой размерности сигнального подпространства от истинного ($\Delta N = N' - N$) варьировали в некотором диапазоне, с максимальным абсолютным значением отклонения около $N_{\max} = 20$. Зависимость $\Sigma[(\Delta f)^2](\Delta N)$ – суммы Σ квадратов ошибок нахождения частот сигнальных компонент $(\Delta f)^2$ методом root-MUSIC от отклонения ΔN предполагаемой размерности сигнального подпространства от истинного показана на рис. 1.

Полученная зависимость имеет характерные особенности: меньшая ошибка при отклонении значений количества составляющих сигнала $\Delta N < 0$, резкий рост ошибки вблизи $\Delta N = 0$, а затем почти постоянный уровень при $\Delta N > 0$. Относительно высокое значение

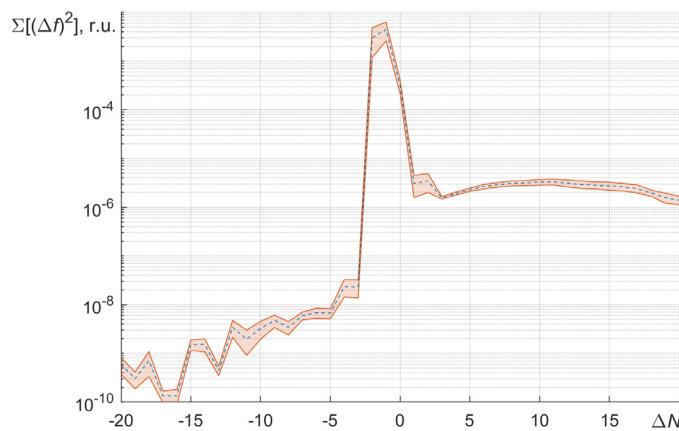


Рис. 1. Зависимость суммы квадратов ошибок нахождения частот сигнальных компонент $\Sigma[(\Delta f)^2]$ от ΔN – отклонения размерности сигнального подпространства от истинного. Представлены: кривая среднего значения ошибки (пунктирная линия) и размытая цветная кривая отклонения от этого среднего на величину среднеквадратического отклонения

ошибки при $\Delta N > 0$ обусловлено тем, что анализируется сумма квадратов всех ошибок и большие погрешности частот отдельных компонентов вносят гораздо больший вклад, чем меньшие.

Когда отклонение количества сигнальных компонент ΔN оказывается отрицательным, метод root-MUSIC идентифицирует только компоненты с наибольшими амплитудами. Для этих компонент отношение сигнал/шум (SNR), соответственно, было самым высоким (поскольку уровень шума был одинаковым для всех частотных компонент в одном сигнале), а это приводило к наименьшим ошибкам. В то время как root-MUSIC идентифицировал большее количество компонент при значениях ΔN , приближающихся к нулю, амплитуды компонент и значения SNR понижались, а соответствующие ошибки оценки частоты возрастили, что отражалось в резком увеличении ошибок. Тот факт, что для некоторых сигналов наблюдалось резкое увеличение погрешности вблизи точки $\Delta N = 0$, говорит о вероятности неправильной оценки составляющей сигнала (ее частота может сильно отличаться от истинной) под влиянием шума. Это указывает на то, что в практических ситуациях с большим разбросом амплитуд сигнальных компонент, когда существует вероятность низких значений SNR, предпочтительно слегка завышать размерность сигнального подпространства, если необходимо идентифицировать все компоненты. Однако применение такой меры может потребовать дополнительной идентификации компонент, с тем чтобы исключить ложные компоненты и оставить правильно идентифицированные.

Дополнительно было промоделировано влияние размерности сигнального подпространства на возможность улучшения продольной пространственной разрешающей способности ОКТ. Параметры численного эксперимента были аналогичны указанным выше, основные отличия состояли в меньшем количестве интерференционных компонент (их было всего две). Амплитуды компонент были одинаковы, разницу частот варьировали от $0,05f_s/M$ до $1,00f_s/M$ (величина f_s/M при пересчете на разность оптических путей в формуле (2) соответствует пределу разрешающей способности при обработке с помощью быстрого преобразования Фурье (см. формулу (1)). Численные эксперименты проводили для трех значений SNR: 40, 60 и 80 дБ. Размерность сигнального подпространства выбиралась равной 2, 4, 10, 20, 50, 100, 200. Для каждой комбинации разницы частот компонент сигнала, значения отношения сигнал/шум и размерности сигнального подпространства вычисления повторялись с 30 различными реализациями шума для оценки среднеквадратического отклонения найденных значений частот компонент сигнала σ_f . В случае различия между истинным и найденным значениями частот менее σ_f , алгоритм root-MUSIC признавался работоспособным. Наименьшая разность частот Δf , при которой реализовывалась работоспособность алгоритма root-MUSIC, служила оценкой разрешающей способности, достижимой в данных условиях. Зависимости нормированной

величины $\Delta f/(f_s/M)$ от размерности сигнального подпространства N' при разных значениях SNR приведены на рис. 2.

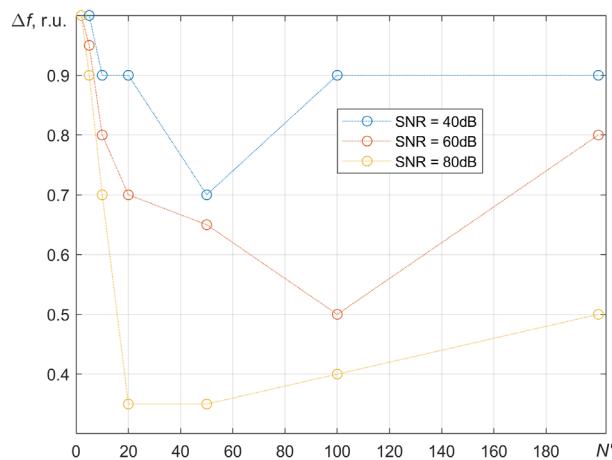


Рис. 2. Зависимости нормированной величины разрешающей (по частоте) способности метода root-MUSIC от размерности сигнального подпространства для разных значений отношения сигнал/шум (SNR)

Как видно из результатов численного эксперимента, оптимальное значение размерности сигнального подпространства зависит от SNR, однако значения от 50 до 100 обеспечивают улучшение разрешающей способности измерений, по сравнению с обработкой при помощи быстрого преобразования Фурье при всех значениях SNR, при которых проводился численный эксперимент.

Экспериментальная реализация метода

Спектральные интерференционные сигналы регистрировались при помощи опросного устройства для волоконно-оптических датчиков NI PXIe-4844, включающего перестраиваемый лазер и фотоприемники. Оптоэлектронная часть опросного устройства аналогична устройству Micron Optics si155-EV-04-1510-1590-0010-NO, имеющего следующие характеристики:

спектральный диапазон $\lambda = 1,51 - 1,59$ мкм (центральная длина волны $\lambda_0 = 1,55$ мкм, ширина диапазона $\Delta\lambda = 80$ нм);

выходная оптическая мощность $P_0 = 60$ мВт в каждом канале;

частота измерения интерференционных сигналов — 10 Гц.

Как показали наши дополнительные измерения [26], эквивалентная мощность шума (NEP) фотодетекторов, используемых в опросном устройстве, составляет 80 пВт во всей рабочей полосе фотоприемника (около 1 МГц), относительные шумы интенсивности лазера (RIN) имеют уровень -50 дБ во всем диапазоне частот.

В роли зонда ОКТ-системы выступал одномодовый волоконно-оптический патчкорд с волокном SMF-28. Зонд подключался прямо к одному из каналов опросного устройства. Использовалась конфигурация ОКТ с общим путем, в которой отражение от торца подводящего оптического волокна создает опорную волну, отраженную от границы волокно — воздух. Интерференция этой опорной волны со световыми волнами, отраженными от неоднородностей исследуемого объекта, приводит к формированию интерференционных сигналов. Как волоконный зонд ОКТ, так и исследуемые образцы волокон были установлены на микропозиционеры Standa 7TF2, обеспечивающие точность перемещения на уровне единиц микрометров.

Оценка работоспособности системы

Уровень шума интерференционного сигнала оценивали для известных параметров опросного устройства NI PXIe-4844 с использованием модели [27]. Если пренебречь

расходимостью светового пучка, выходящего из ОКТ-зонда, и предположить, что три волны с наибольшими амплитудами, отраженные от границ раздела стекло – воздух (торец волоконно-оптического зонда ОКТ и обе границы тестируемого волокна), выступают основным фактором, влияющим на интенсивность отраженных волн, то можно легко оценить аддитивный шум интерференционного сигнала. Такой шум рассчитывается как

$$\sigma_{add} \approx 3 R_{Fa} P_0 \text{RIN} + \text{NEP}, \quad (6)$$

где P_0 – выходная оптическая мощность; RIN – относительные шумы интенсивности лазера; NEP – эквивалентная мощность шума фотодетекторов; R_{Fa} – коэффициент отражения Френеля на границе раздела стекло – воздух.

Коэффициент отражения следует выражению

$$R_{Fa} = [(n_{fiber} - n_{air}) / (n_{fiber} + n_{air})]2, \quad (7)$$

где n_{fiber} , n_{air} – показатели преломления волокна и воздуха, соответственно.

В спектральном диапазоне 1,55 мкм значение R_{Fa} составляет около 3,5%, что приводит к уровню аддитивного шума $\sigma_{add} \approx 1,5 \text{ нВт}$.

Для правильной оценки амплитуд интерференционных компонент необходимо учесть расходимость световых волн, что, однако, является относительно сложной задачей, если принять во внимание кривизну отражающих поверхностей и возможное угловое смещение.

Таким образом, мы сознательно получили завышенную оценку амплитуд интерференционных компонент, поскольку пренебрегли расходимостью пучка, понимая, что на практике значения амплитуд будут в несколько раз меньше.

В контексте текущей работы отражения на границе между сердцевиной и оболочкой тестируемого оптического волокна являются самыми слабыми. Для одномодовых волокон с разницей показателей преломления сердцевины и оболочки около 10^{-3} френелевское отражение составляет $R \approx 1,2 \cdot 10^{-7}$, что на пять порядков меньше отражения от границы волокна и воздуха: $R_{Fa} \approx 0,035$.

Если объединить все приведенные выше расчеты, то не исключена вероятность получить завышенную оценку значения SNR для самой слабой интерференционной компоненты, которую можно выразить в следующем виде:

$$\text{SNR} = [2 R_{cc} R_{Fa} (P_0)^2] / (\sigma_{add})^2. \quad (8)$$

Для параметров, перечисленных выше, формула (8) приводит к оценке SNR в 10 дБ для интерференционных компонент, образованных волнами, отраженными от границы между сердцевиной и оболочкой. К сожалению, границы Крамера – Рао для полигармонических сигналов нельзя выразить в явном виде, поэтому они были рассчитаны численно в соответствии с процедурой в статье [18]. При этом в интерференционном сигнале предполагалось наличие четырех интерференционных компонент со следующими значениями амплитуд A_i и разностей оптических путей L_i :

$$A_1 = A_4 = 3,5 \text{ мкВт}, A_2 = A_3 = 6,5 \text{ нВт},$$

$$L_1 = 30 \text{ мкм}, L_2 = 115 \text{ мкм}, L_3 = 127 \text{ мкм}, L_4 = 212 \text{ мкм}.$$

В этих условиях наилучшей достижимой разрешающей способностью оценки расстояния от торца волоконного ОКТ-зонда до границы между сердцевиной и оболочкой оказывается значение $\sigma_{Lec} \approx 1,2 \text{ нм}$.

Следует отметить, что в ходе приведенных выше умозаключений было сделано несколько допущений, поэтому значение 1,2 нм может оказаться слишком оптимистичной оценкой. Более того, вычисленное выше значение есть мера минимального обнаруживаемого изменения расстояния от волоконного зонда ОКТ до границы между сердцевиной и оболочкой волокна, а не пространственной разрешающей способностью, характеризующей минимальное различие разностей оптических путей независимо разрешимых интерференционных компонент. Более того, наилучшая работоспособность алгоритма goot-MUSIC достигается в случае достаточно большой разницы между частотами сигнальных компонент, которые можно определять традиционными методами обработки, а не в режиме сверхразрешения.

Приведенная выше оценка σ_{Lcc} может использоваться и для оценки наличия паразитных механических колебаний исследуемого объекта. Для этого необходимо измерять перемещение основных отражателей, например, путем оценки аргументов основных интерференционных компонент, как это часто делается в спектральной интерферометрии и фазочувствительной ОКТ [28, 29]. При существенном превышении уровня измеренных вибраций над величиной σ_{Lcc} следует осуществить компенсацию паразитных вибраций.

Результаты измерений

Нами были проведены измерения поперечного профиля коэффициента отражения когерентного излучения для двух образцов волокон:

многомодового волокна, покрытого слоем полимера и обладающего ступенчатым профилем показателя преломления (марка Thorlabs FG050LGA);

одномодового волокна SMF-28 без покрытия.

Взаимное расположение волокон (зондирующего и тестируемого) схематично показано на рис. 3. Исследуемое оптическое волокно крепилось в микропозиционере горизонтально, ОКТ-зонд также располагался горизонтально, направление зонда в азимутальной плоскости выбиралось таким образом, чтобы амплитуда наблюдаемого интерференционного сигнала была максимальной. Интерференционные сигналы регистрировались при перемещении ОКТ-зонда по высоте и соответствовали различным сечениям исследуемого волокна; это позволяло визуализировать его поперечное сечение в виде двумерного скана (*B*-скан). Величина шага при перемещении ОКТ-зонда составляла 2 мкм.

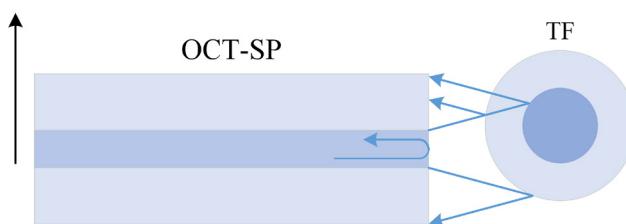


Рис. 3. Схематическое изображение взаимного расположения исследуемого волокна и ОКТ-зонда (в их поперечных сечениях):

OCT-SP – зонд ОКТ-системы; TF – тестируемое волокно. Вертикальная стрелка указывает направление перемещения зонда, синие стрелки – направления отраженных световых волн

Как было установлено в процессе численного моделирования, для эффективной работы алгоритма root-MUSIC требуется высокое значение SNR обрабатываемого сигнала. Для улучшения SNR в условиях оснащения наших экспериментов, для каждой позиции ОКТ-зонда измерялось 200 интерференционных сигналов. Перед применением алгоритма root-MUSIC вначале мы определяли фазы основных интерференционных компонент, образованных волнами, отраженными от границ между наружной оболочкой оптического волокна и окружающим воздухом. Затем вычисляли среднеквадратическое отклонение позиции исследуемого

волокна относительно позиции ОКТ-зонда. Во всех случаях это отклонение составляло от 1 до 2 нм, что близко к приведенному выше значению разрешающей способности разности оптических путей $\sigma_{Lcc} \approx 1,2$ нм. Такое соотношение свидетельствовало об отсутствии паразитных механических флюктуаций в экспериментальной установке.

Следующий шаг состоял в усреднении интерференционных сигналов для улучшения величины SNR. Все приведенные далее результаты были получены с размерностью сигнального подпространства в алгоритме root-MUSIC, равной 50. Наш выбор избыточной размерности сигнального подпространства определялся высокой разрешающей способностью, реализуемой в данном случае, а также простотой идентификации ложных компонент сигнала, находимых методом root-MUSIC за счет предсказуемой структуры исследуемого объекта.

С точки зрения требований к ОКТ-системе, наиболее простой задачей представляется визуализация структуры многомодового волокна, ввиду относительно большой разницы между показателями преломления сердцевины и оболочки, а также большого диаметра сердцевины. Часть *B*-скана многомодового волокна с неснятым полимерным покрытием показана на рис. 4, *a*. Изображение было получено путем применения быстрого преобразования Фурье к интерференционным сигналам; интенсивность отраженного сигнала от определенной области образца показана цветом соответствующей точки изображения. Результаты обработки интерференционных сигналов с помощью метода root-MUSIC



показаны в виде круговых маркеров, наложенных на карту интенсивности. Следует отметить, что на рисунке присутствует большое количество маркеров.

Все методы спектральной интерферометрии, включая ОКТ, определяют разность оптических путей интерферирующих волн. Поскольку показатель преломления кварца $n_{fiber} \approx 1,46$ отличается от показателя преломления воздуха $n_{air} \approx 1,00$, а в контексте данной работы важно было определить геометрические параметры внутренней структуры кварцевых оптических волокон, числовые значения по вертикальной оси были пересчитаны из разностей оптических путей делением на $n_{fiber} \approx 1,46$. Слабо заметные отражения на глубинах около 320 и 800 мкм соответствуют наружным границам полимерного покрытия, более сильные отражения на глубинах около 480 и 600 мкм соответствуют границам оболочки волокна и полимерного покрытия.

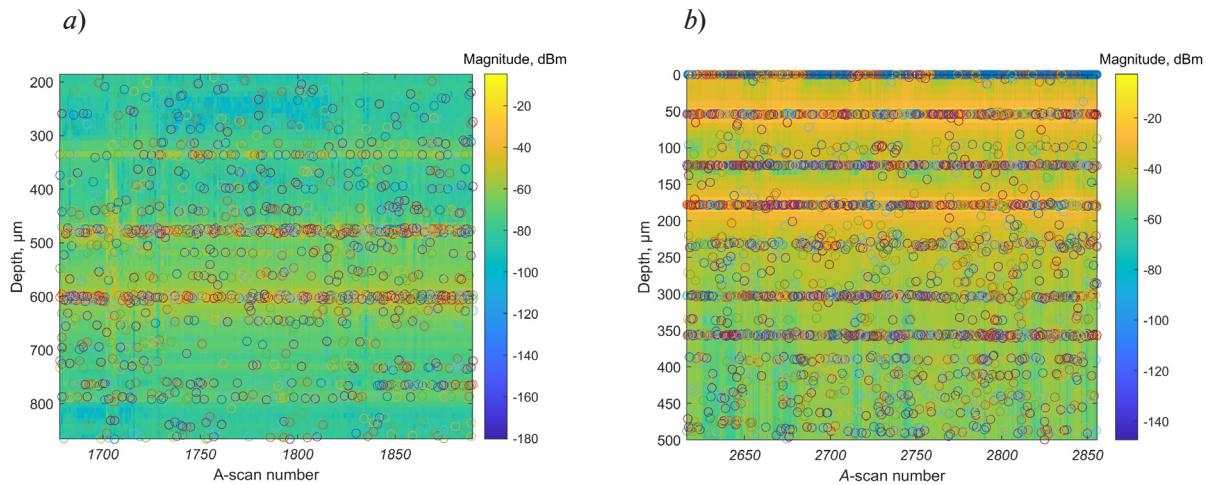


Рис. 4. Сравнение *B*-сканов многомодового волокна с полимерным покрытием (*a*) и одномодового без покрытия (*b*): вычисленных с использованием быстрого преобразования Фурье (цветовые карты интенсивности) и методом root-MUSIC с размерностью сигнального подпространства, равной 50 (круглые маркеры)

Анализ изображений на рис. 4, *a* показывает, что границы волокна четко просматриваются сквозь полимерное покрытие, однако сердцевину волокна невозможно точно идентифицировать из-за сильного рассеяния света внутри полимерного покрытия. Интерференционные сигналы с номерами *A*-сканов от 1800 до 1900 были нами усреднены, что привело к подавлению этого рассеяния благодаря его случайному характеру. *A*-скан, полученный таким образом, показан на рис. 5, *a*. Видно, что усреднение подавляет влияние рассеяния и позволяет успешно идентифицировать границы между сердцевиной и оболочкой волокна с помощью алгоритма root-MUSIC. Наша оценка диаметра сердцевины, которая составила 49,9 мкм (выполнена по результатам обработки алгоритмом root-MUSIC), практически совпадает с его истинным значением, равным 50,0 мкм.

Аналогичные измерения были выполнены для одномодового волокна. На рис. 4, *b* показан фрагмент *B*-скана поперечного сечения стандартного одномодового волокна SMF-28.

Так же, как и для сигналов от многомодового волокна, изображение было получено путем применения быстрого преобразования Фурье к интерференционным сигналам, в то время как результаты обработки интерференционных сигналов методом root-MUSIC показаны в виде круговых маркеров. Отражения на глубинах около 50 и 175 мкм соответствуют поверхности волокна, на глубине около 130 мкм — границам между сердцевиной и оболочкой. Анализ изображений на рис. 4, *b* опять показывает, что эти границы нельзя разрешить с помощью классического метода вычисления *A*-сканов на основе быстрого преобразования Фурье. Чтобы улучшить SNR обрабатываемого интерференционного сигнала, мы провели усреднение сигналов с номерами от 2730 до 2830, после чего интерференционный сигнал с улучшенным SNR был обработан с использованием алгоритма

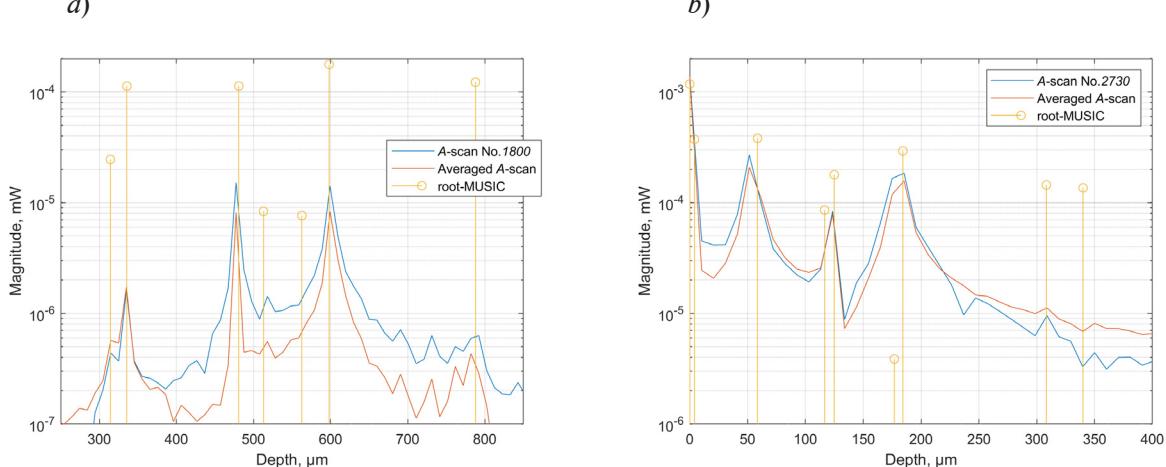


Рис. 5. Сравнение *A*-сканов многомодового волокна с полимерным покрытием (*a*) и одномодового без покрытия (*b*):

полученных для интерференционных сигналов (ИС) № 1800 (*a*) и № 2730 (*b*) (синие кривые);
для усредненных ИС с номерами от 1800 до 1900 (*a*) и с номерами от 2730 до 2830 (*b*)
(красные кривые), а также результатов обработки усредненных ИС методом root-MUSIC
с размерностью сигнального подпространства, равной 50 (*a*, *b*) (желтые вертикали)

root-MUSIC. Соответствующие *A*-сканы сопоставлены на рис. 5, *b*, где представлены исходный и усредненный *A*-сканы и результат обработки последнего с помощью алгоритма root-MUSIC.

Следует также отметить, что экспериментально измеренный аддитивный шум в интерференционных сигналах был равен 0,8 нВт в случае однократного отражения от оптоволоконного зонда ОКТ. Когда свет, отраженный от тестируемого одномодового волокна, был зафиксирован ОКТ-зондом, уровень аддитивного шума достиг значения 1,3 нВт, что очень близко к аналитической оценке в 1,5 нВт. Это незначительное расхождение, скорее всего, связано с расходностью светового пучка и, следовательно, меньшей долей шумов интенсивности лазера в аддитивный шум интерференционного сигнала.

После усреднения 100 интерференционных сигналов суммарный шум снизился с 1,30 до 0,15 нВт, что указывает на почти полное отсутствие корреляции между реализациями шума и доказывает, что усреднение большего числа сигналов может привести к дальнейшему улучшению разрешения, однако за счет снижения скорости измерения.

Амплитуда интерференционных компонент, соответствующих световым волнам, отраженным от поверхности раздела сердцевина-оболочка одномодового волокна, оказалась близкой к значению 15 нВт, обеспечивая тем самым значение SNR около 17 дБ, что было гораздо выше ожидаемого. Для того чтобы разрешить две интерференционные компоненты, которые различались по разности оптических путей на 8 мкм (что соответствует 11,7 мкм на воздухе), потребовалось почти 10-кратное улучшение значения SNR. Это указывает на необходимость проведения дальнейших исследований влияния величины SNR, паразитной модуляции интерференционных компонент и близости их расположения на работоспособность метода root-MUSIC (однако это выходит за рамки настоящей статьи).

Следует также отметить, что использование избыточной размерности подпространства сигнала в алгоритме root-MUSIC привело к выявлению некоторых побочных компонент, вызванных шумами и несовершенством экспериментальной установки. Например, дублирование интерференционных компонент на границах волокна было вызвано круглой формой поперечного сечения оптического волокна и, следовательно, не единственной разницей оптических путей между интерферирующими волнами, а скорее некоторыми разными вариантами путей, которые могли бы пройти отраженные волны, и, следовательно, диапазоном разницы оптических путей между отраженными и опорными волнами. Этот паразитный эффект можно устранить через оптимизацию характеристик волоконного ОКТ-датчика, в том числе фокусировки выходного светового пучка. Для повышения общей производительности метода ОКТ может потребоваться оптимизация параметров фокусирующей линзы для каждой отдельной измерительной задачи.



Заключение

В работе предложен новый подход к неразрушающему контролю внутренней структуры оптического волокна, который может быть весьма востребован в процессах изготовления волоконно-оптических датчиков, волоконно-оптических устройств ввода излучения в волокно и вывода из него, а также других компонентов волоконной и интегральной фотоники.

Экспериментально продемонстрированы возможности визуализации сердцевин как одномодового волокна, так и многомодового, покрытого полимерным слоем толщиной более 0,1 мм, с использованием оптической когерентной томографии и алгоритма root-MUSIC для построения *A*-сканов.

Важной особенностью предложенного метода является использование в системе оптической когерентной томографии типовой (относительно) телекоммуникационной оптоэлектронной компонентной базы.

В ходе проведенных теоретических и численных оценок определены и сформулированы требования для обеспечения сверхразрешения алгоритмом root-MUSIC. Кроме того, применение этого алгоритма для обработки интерференционных сигналов оптической когерентной томографии позволяет автоматизировать сегментацию полученных изображений, упростить их интерпретацию, а главное – обеспечивает улучшение пространственного разрешения.

Предложенный подход планируется использовать для визуализации мест сварки одномодового и многомодового волокон при создании волоконно-оптических датчиков физических величин на основе межмодовых интерферометров. Проблема состоит в том, что зачастую интерференционные сигналы от таких датчиков отличаются от предсказанных теоретически. Наиболее перспективный способ ее решения – это оптимизация режима сварки двух различающихся волокон, а для этого нужно получать количественную информацию о распределении показателя преломления этих волокон в местах сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lobach I. A., Fotiadi A. A., Yatseev V. A., Konstantinov Y. A., Barkov F. L., Claude D., Kambur D. A., Belokrylov M. E., Turov A. T., Korobko D. A. Newest methods and approaches to enhance the performance of optical frequency-domain reflectometers // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 16. P. 5432.
2. Пономарев Р. С., Константинов Ю. А., Белокрылов М. Е., Шевцов Д. И., Карнаушкин П.В. Автоматизированный инструмент рефлектометрического исследования пироэлектрического эффекта в протонообменных канальных волноводах на основе ниобата лития // Приборы и техника эксперимента. 2022. Т. 65. № 5. С. 96–106.
3. Konstantinov Y. A., Turov A. T., Latkin K. P., Claude D., Azanova I. S. A non-destructive study of optical, geometric and luminescent parameters of active optical fibers preforms // Optics. 2024. Vol. 5. No. 1. Pp. 176–194.
4. Vladimirova D., Pervadchuk V., Konstantinov Y. Manufacture of microstructured optical fibers: Problem of optimal control of silica capillary drawing process // Computation. 2024. Vol. 12. No. 5. P. 86.
5. Podoleanu A. G. Fiber optics, from sensing to non invasive high resolution medical imaging // Journal of Lightwave Technology. 2010. Vol. 28. No. 4. Pp. 624– 640.
6. Fujimoto J., Swanson E. The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography // Investigative Ophthalmology & Visual Science. 2016. Vol. 57. No. 9. Pp. OCT1 – OCT13.
7. Gong Zh., Yu Ch., Guo D., Ding Zh., Li P. Three-dimensional optical coherence digital-null deformography of multi-refractive-surface optics with nanometer sensitivity // Optics Express. 2022. Vol. 30. No. 23. Pp. 42069–42085.
8. Ozaki N., Ishida K., Nishi T., Ohsato H., Watanabe E., Ikeda N., Sugimoto Y. OCT with a visible broadband light source applied to high-resolution nondestructive inspection for semiconductor optical devices (Chapter 10) // M. R. Wang (Editor). “Optical coherence tomography and its non-medical applications”. USA: IntechOpen, 2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.87102>

9. **Opitz J., Porstmann V., Schreiber L., et al.** Optical coherence tomography as monitoring technology for the additive manufacturing of future biomedical parts // Meyendorf N., Ida N., Singh R., Vrana J. (Eds.). “Handbook of nondestructive evaluation 4.0”. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022. Pp. 859–881.
10. **Saccon F. A. M., Muller M., Fabris J. L.** Optical fiber characterization by optical coherence tomography // Proceedings of the International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2009). 3–6 November, 2009. Belem, Brazil. Pp. 625–628.
11. **Henao R. H., Pomarico J. A., Russo N. A., Torroba R., D., Trivi M.** Multimode optical fiber core measurement by speckle correlation // Optical Engineering. 1996. Vol. 35. No. 1. Pp. 26–30.
12. **Golnabi H.** Fiber core size determination from power measurements in a fiber-to-fiber design // Microwave and Optical Technology Letters. 2011. Vol. 53. No. 6. Pp. 1225–1229.
13. **Drexler W.** Ultrahigh-resolution optical coherence tomography // Journal of Biomedical Optics. 2004. Vol. 9. No. 1. Pp. 47–74.
14. **Ушаков Н. А., Маковецкая Т. А., Маркварт А. А., Лиокумович Л. Б.** Теоретические основы квантовой спектральной оптической когерентной томографии с частотным сканированием // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 117. № 1. С. 29–36.
15. **Li Y., Zhao K., Zhao J., Wang J., Wright R., Buric M., Chen K. P.** Super-resolution demodulation for fiber sensor arrays based on the MUSIC algorithm // Optics Letters. 2022. Vol. 47. No. 10. Pp. 2390–2393.
16. **Langoju R., Patil A., Rastogi P.** Super-resolution Fourier transform method in phase shifting interferometry // Optics Express. 2005. Vol. 13. No. 18. Pp. 7160–7173.
17. **Ushakov N., Markvart A., Liokumovich L.** Singlemode-multimode-singlemode fiber-optic interferometer signal demodulation using MUSIC algorithm // Photonics. 2022. Vol. 9. No. 11. P. 879.
18. **Rife D. C., Boorstyn R. R.** Multiple tone parameter estimation from discrete time observations // Bell System Technical Journal. 1976. Vol. 55. No. 9. Pp. 1389–1410.
19. **Schmidt R. O.** Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34. No. 3. Pp. 276–280.
20. **Rao B. D., Hari K. V. S.** Performance analysis of Root-Music // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1989. Vol. 37. No. 12. Pp. 1939–1949.
21. **Stoica P., Nehorai A.** MUSIC, maximum likelihood, and Cramér-Rao bound: further results and comparisons // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1990. Vol. 38. No. 12. Pp. 2140–2150.
22. **Wax M., Kallath T., Kailath T.** Detection of signals by information theoretic criteria // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1985. Vol. 33. No. 2. Pp. 387–392.
23. **Zhao L. C., Krishnaiah P. R., Bai Z. D.** On detection of the number of signals in presence of white noise // Journal of Multivariate Analysis. 1986. Vol. 20. No. 1. Pp. 1–25.
24. **Stoica P., Selen Y.** Model-order selection // IEEE Signal Processing Magazine. 2004. Vol. 21. No. 4. Pp. 36–47.
25. **Munkres J.** Algorithms for the assignment and transportation problems // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1957. Vol. 5. No. 1. Pp. 32–38.
26. **Ushakov N. A., Markvart A. A., Liokumovich L. B.** Enhancing the resolution limits of spectral interferometric measurements with swept-wavelength interrogation by means of a reference interferometer // Applied Optics. 2015. Vol. 54. No. 19. Pp. 6029–6036.
27. **Ushakov N. A., Liokumovich L. B.** Resolution limits of extrinsic Fabry –Perot interferometric displacement sensors utilizing wavelength scanning interrogation // Applied Optics. 2014. Vol. 53. No. 23. Pp. 5092–5099.
28. **Ushakov N. A., Markvart A. A., Liokumovich L. B.** Pulse wave velocity measurement with multiplexed fiber optic Fabry – Perot interferometric sensors // IEEE Sensors Journal. 2020. Vol. 20. No. 19. Pp. 11302–11312.
29. **Li P., Shen T. T., Johnstone M., Wang R. K.** Pulsatile motion of the trabecular meshwork in healthy human subjects quantified by phase-sensitive optical coherence tomography // Biomedical Optics Express. 2013. Vol. 4. No. 10. P. 2051.



REFERENCES

1. Lobach I. A., Fotiadi A. A., Yatseev V. A., et al., Newest methods and approaches to enhance the performance of optical frequency-domain reflectometers, Sensors. 24 (16) (2024) 5432.
2. Ponomarev R. S., Konstantinov Yu. A., Belokrylov M. E., et al., An automated instrument for reflectometry study of the pyroelectric effect in proton-exchange channel waveguides based on lithium niobate, Instrum. Exp. Tech. 65 (5) (2022) 787–796.
3. Konstantinov Y. A., Turov A. T., Latkin K. P., et al., A non-destructive study of optical, geometric and luminescent parameters of active optical fibers preforms, Optics. 5 (1) (2024) 176–194.
4. Vladimirova D., Pervadchuk V., Konstantinov Y., Manufacture of microstructured optical fibers: Problem of optimal control of silica capillary drawing process, Comput. 12 (5) (2024) 86.
5. Podoleanu A. G., Fiber optics, from sensing to non invasive high resolution medical imaging, J. Light. Technol. 28 (4) (2010) 624– 640.
6. Fujimoto J., Swanson E., The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography, Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 57 (9) (2016) OCT1 – OCT13.
7. Gong Zh., Yu Ch., Guo D., et al., Three-dimensional optical coherence digital-null deformography of multi-refractive-surface optics with nanometer sensitivity, Opt. Express. 30 (23) (2022) 42069–42085.
8. Ozaki N., Ishida K., Nishi T., et al., OCT with a visible broadband light source applied to high-resolution nondestructive inspection for semiconductor optical devices (Chapter 10), In book: M. R. Wang (Editor). “Optical coherence tomography and its non-medical applications”, IntechOpen, 2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/int>.
9. Opitz J., Porstmann V., Schreiber L., et al., Optical coherence tomography as monitoring technology for the additive manufacturing of future biomedical parts, In book: Meyendorf N., Ida N., Singh R., Vrana J. (Eds.). “Handbook of nondestructive evaluation 4.0”. Springer International Publishing, Cham, Switzerland (2022) 859– 881.
10. Saccon F. A. M., Muller M., Fabris J. L., Optical fiber characterization by optical coherence tomography, Proc. Int. Microwave and Optoelectronics Conf. (IMOC 2009). 3–6 Nov. 2009. Belem, Brazil (2009) 625–628.
11. Henao R. H., Pomarico J. A., Russo N. A., et al., Multimode optical fiber core measurement by speckle correlation, Opt. Eng. 35 (1) (1996) 26–30.
12. Golnabi H., Fiber core size determination from power measurements in a fiber-to-fiber design, Microwave Opt. Technol. Lett. 53 (6) (2011) 1225–1229.
13. Drexler W., Ultrahigh-resolution optical coherence tomography, J. Biomed. Opt. 9 (1) (2004) 47–74.
14. Ushakov N. A., Makovetskaya T. A., Markvert A. A., Liokumovich L. B., Theoretical foundations of quantum spectral-domain optical coherence tomography with frequency scanning, JETP Lett. 117 (1) (2023) 24–31.
15. Li Y., Zhao K., Zhao J., et al., Super-resolution demodulation for fiber sensor arrays based on the MUSIC algorithm, Opt. Lett. 47 (10) (2022) 2390–2393.
16. Langoju R., Patil A., Rastogi P., Super-resolution Fourier transform method in phase shifting interferometry, Opt. Express. 13 (18) (2005) 7160–7173.
17. Ushakov N., Markvert A., Liokumovich L., Singlemode-multimode-singlemode fiber-optic interferometer signal demodulation using MUSIC algorithm, Photonics. 9 (11) (2022) 879.
18. Rife D. C., Boorstyn R. R., Multiple tone parameter estimation from discrete time observations, Bell Syst. Tech. J. 55 (9) (1976) 1389–1410.
19. Schmidt R. O., Multiple emitter location and signal parameter estimation, IEEE Trans. Antennas Propag. 34 (3) (1986) 276–280.
20. Rao B. D., Hari K. V. S., Performance analysis of Root-Music, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 37 (12) (1989) 1939–1949.
21. Stoica P., Nehorai A., MUSIC, maximum likelihood, and Cramér-Rao bound: further results and comparisons, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 38 (12) (1990) 2140–2150.
22. Wax M., Kallath T., Kailath T., Detection of signals by information theoretic criteria, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 33 (2) (1985) 387–392.
23. Zhao L. C., Krishnaiah P. R., Bai Z. D., On detection of the number of signals in presence of white noise, J. Multivar. Anal. 20 (1) (1986) 1–25.

24. Stoica P., Selen Y., Model-order selection, IEEE Signal Process. Mag. 21 (4) (2004) 36–47.
25. Munkres J., Algorithms for the assignment and transportation problems, SIAM J. Appl. Math. 5 (1) (1957) 32–38.
26. Ushakov N. A., Markvart A. A., Liokumovich L. B., Enhancing the resolution limits of spectral interferometric measurements with swept-wavelength interrogation by means of a reference interferometer, Appl. Opt. 54 (19) (2015) 6029–6036.
27. Ushakov N. A., Liokumovich L. B., Resolution limits of extrinsic Fabry – Perot interferometric displacement sensors utilizing wavelength scanning interrogation, Appl. Opt. 53 (23) (2014) 5092–5099.
28. Ushakov N. A., Markvart A. A., Liokumovich L. B., Pulse wave velocity measurement with multiplexed fiber optic Fabry – Perot interferometric sensors, IEEE Sens. J. 20 (19) (2020) 11302–11312.
29. Li P., Shen T. T., Johnstone M., Wang R. K., Pulsatile motion of the trabecular meshwork in healthy human subjects quantified by phase-sensitive optical coherence tomography, Biomed. Opt. Express. 4 (10) (2013) 2051.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРОВЕНКО Зоя Андреевна – ассистент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
zoya199306@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9196-8038

МАРКВАРТ Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
markvart_aa@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-8080-0830

ПЕТРОВ Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alexandr-petroff1994@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-5216-6588

БИСЯРИН Михаил Александрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
bisyarin@spbu.ru
ORCID: 0000-0003-3891-1339

ЛИОКУМОВИЧ Леонид Борисович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
leonid@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-5988-1429



УШАКОВ Николай Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
n.ushakoff@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3480-2779

THE AUTHORS

EROVENKO Zoya A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
zoya199306@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9196-8038

MARKVART Aleksandr A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
markvart_aa@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-8080-0830

PETROV Aleksandr V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
alexandr-petroff1994@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-5216-6588

BISYARIN Mikhail A.

St. Petersburg State University
7–9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia
m.bisyarin@spbu.ru
ORCID: 0000-0003-3891-1339

LIOKUMOVICH Leonid B.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
leonid@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-5988-1429

USHAKOV Nikolai A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
n.ushakoff@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3480-2779

*Статья поступила в редакцию 02.05.2025. Одобрена после рецензирования 14.05.2025.
Принята 14.05.2025.*

Received 02.05.2025. Approved after reviewing 14.05.2025. Accepted 14.05.2025.