

УДК 517.444; 519.612; 519.613

DOI: 10.25559/SITITO.18.202204.829-837

Оригинальная статья

Граничные условия алгебраического решения малоракурсной волоконно-оптической томографической задачи

И. В. Денисов*, Д. Н. Пискун

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Российская Федерация

Адрес: 236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14

* igordenisov@inbox.ru

Аннотация

Приведено общее математическое описание для двух новых схем укладки волоконно-оптических измерительных линий распределенной волоконно-оптической измерительной сети по трем направлениям со смещением диагональных линий зигзагообразным способом. Представлены численные результаты, доказывающие преимущества новых схем укладки по сравнению с традиционными для волоконно-оптических измерительных сетей. Обосновано развитие распределенных волоконно-оптических измерительных сетей на основе протяженных чувствительных элементов интерферометрического типа для формирования синопграмм внешних физических полей. Доказана применимость к ним подходов малоракурсной волоконно-оптической томографии при решении задач контроля состояния распределенных волоконно-оптических измерительных сетей на протяженных участках для систем мониторинга физических полей. Дано описание выделения полезного сигнала из общего потока поступающих данных, состав и особенности помех и шумов. Представлены граничные условия для работы такой системы мониторинга с точки зрения внешних условий, критериев для рассматриваемых волоконно-оптических интерферометрических чувствительных элементов и соотношения сигнал/шум. Приведены результаты моделирования для двух крайних случаев рассматриваемых внешних физических воздействий на распределенную измерительную сеть. Продемонстрированы возможности выделения и обработки полезных сигналов, имеющих значения практически на уровне шумов, а также работы системы мониторинга с низким уровнем шумов. Цель работы – дать математическое обоснование перспективности применения двух новых схем укладки волоконно-оптических измерительных линий распределенной сети для перехода к томографической реализации системы охраны протяженных участков со скрытыми волоконно-оптическими интерферометрическими чувствительными элементами в очерченных граничных условиях работы системы мониторинга физических полей.

Ключевые слова: распределенная волоконно-оптическая измерительная сеть, схема укладки линий, волоконно-оптическая томография, граничные условия, алгебраические методы решения, система мониторинга протяженных физических полей

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Денисов И. В., Пискун Д. Н. Граничные условия алгебраического решения малоракурсной волоконно-оптической томографической задачи // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 4. С. 829-837. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202204.829-837>

© Денисов И. В., Пискун Д. Н., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Boundary Conditions for Algebraic Solution of Few View Fiber-Optical Tomographic Problem

I. V. Denisov*, D. N. Piskun

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

Address: 14 Nevskogo St., Kaliningrad 236016, Russian Federation

* igordenisov@inbox.ru

Abstract

General mathematical definition of two layouts of the fiber-optical measuring lines on distributed fiber-optical measuring network in three directions with diagonal lines removal and zigzag method are given. The results on advantages of new layouts as opposed to traditional are presented. The development of distributed fiber-optical measuring networks based on extended interferometric-type sensing elements for synograms formation of external physical fields is substantiated. The applicability of few view fiber-optical tomography for solving problems of distributed fields monitoring on extended perimeters has been proven. The description of useful signal allocation from the general flow of incoming data, composition and features of interference and noise is given. The boundary conditions for operation of such monitoring system are presented in terms of external conditions, criteria for considered fiber-optical interferometric sensing elements and the signal-to-noise ratio. The results of modeling for two extreme cases of considered external physical influences on a distributed measuring network are presented. The possibilities of isolating and processing useful signals that have values almost at the noise level, as well as the operation of the monitoring system with low noise level, are demonstrated. The purpose of this work is mathematical justification of two new layouts of fiber-optical measuring lines for transition to tomographic implementation of security system for extended areas with hidden fiber-optical interferometric sensitive elements, to describe the boundary conditions of physical fields monitoring system.

Keywords: distributed fiber-optical measuring network, measuring line layout, fiber-optical tomography, operating conditions for the algebraic solution, distributed fiber-optic measuring network

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Denisov I.V., Piskun D.N. Boundary Conditions for Algebraic Solution of Few View Fiber-Optical Tomographic Problem. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(4):829-837. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202204.829-837>



Введение

В настоящее время для мониторинга протяженных физических полей объектов со сложной конфигурацией применяются различные информационно-измерительные системы (ИИС)¹. Для многих из них чувствительными недостатками являются ложные срабатки от различного рода помех, зависимости от погодных условий и от времени суток, а также от условий размещения чувствительных элементов (ЧЭ). Размещение их на контролируемой поверхности формирует чувствительные области измерительной сети. При этом количество ЧЭ значительно возрастает в зависимости от увеличения количества чувствительных областей (размерности измерительной сети). Кроме того, необходимо учитывать чувствительность и возможности выделения полезных сигналов ИИС при нескольких воздействиях на измерительную сеть [1].

Для частичного устранения указанных недостатков предлагается использовать ИИС на основе распределенных волоконно-оптических измерительных сетей (РВОИС) и описать граничные условия алгебраического решения задачи восстановления распределения физического поля от нескольких воздействий. Указанная РВОИС состоит из волоконно-оптических измерительных линий (ВОИЛ), уложенных по определенной схеме на контролируемой поверхности² [2, 3]. При возникновении внешних физических воздействий будут изменяться оптические сигналы в волоконных световодах (ВС) уложенных ВОИЛ. Преимущества РВОИС определяются достоинствами ВС по сравнению с другими средами переноса полезных сигналов, а также их техническими и технологическими возможностями при размещении на (или в) контролируемой поверхности. В частности, размещение ВОИЛ в грунте или другом приповерхностном слое позволяют создавать системы мониторинга со скрытыми ЧЭ. Квазипассивный принцип детектирования ВОИЛ не позволяет специальным техническим средствам обнаруживать их, что используется для разработки и создания современных систем охраны протяженных зон со сложной конфигурацией [4].

Совокупность интегральных проекций, формируемых от всех линий по всей РВОИС, образует соответствующую синопамму и будет определять срез состояния контролируемого физического поля. По аналогии с томографическими методами снятия проекций и реконструкции по ним картины объекта такая задача получила название волоконно-оптической томографической задачи (ВОТЗ). Впервые в мире она описана для датчиков в [5, 6], а для ВОИС – в работе [7]. Решение её алгебраическими методами имеет ряд преимуществ по сравнению с другими, например с системами искусственного интеллекта [8]. Более того, практическое комплексирование их между собой для решения ВОТЗ также имеет перспективы дальнейшего развития [9]. Поэтому целью работы стало определение граничных условий алгебраического решения ВОТЗ по состоянию интегральных проекций от РВОИС системы мониторинга внешних физических полей.

Теоретический анализ

Математической задачей томографии является восстановление подынтегральной функции по множеству значений ее интегралов, полученных при тех или иных способах детектирования по линии сканирования, т.е. ставится задача восстановления функции $f(\mathbf{r})$ по множеству значений интегралов вида [10]:

$$g = \int_L f(\mathbf{r})dL \quad (1)$$

где L – контур укладки ВОИЛ. Здесь следует заметить, что в классической постановке она должна быть прямой линией [11]. Выражение (1) является преобразованием Радона функции $f(\mathbf{r})$: $g = \mathbf{R} [f(\mathbf{r})]$. Поэтому математически задача обработки сигналов с РВОИС представляет собой обратное преобразование Радона по интегральным данным, поступающим от ВОИЛ, и для случая волоконной оптики известна как ВОТЗ [12].

В дискретном виде интегральные уравнения преобразуются в систему m линейных уравнений (в ВОТЗ соответствующих сигналам с ВОИЛ) с n неизвестными (в ВОТЗ соответствующих значению физического поля в чувствительных областях РВОИС), которая в матричной форме имеет вид:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (2)$$

где \mathbf{A} – матрица размера $m \times n$, \mathbf{B} – столбец высоты m , \mathbf{X} – столбец высоты n .

Таким образом, в настоящей задаче требуется проверить возможность получения оптимального реконструктивного метода решения системы (2) с применением предлагаемых схем укладки ВОИЛ на РВОИС.

Описание предлагаемых схем укладки

Для решения ВОТЗ необходимо уложить ВОИЛ по такой схеме, чтобы сигналы с них позволяли теми или иными методами реконструировать физическое поле на РВОИС. При этом следует учитывать, что ЧЭ этих ВОИЛ представляют собой квазираспределенные датчики. Наиболее перспективными являются ВОИЛ с ЧЭ интерферометрического типа. Регистрации физических величин с помощью интерферометрических схем позволяют обнаруживать ничтожно малые изменения оптической длины пути излучения в ВС под воздействием внешних физических полей [13]. Кроме того, необходимое соотношение сигнал/шум в таких системах существенно ниже других радиотехнических схем детектирования. В этой конкретике важны практические ограничения на РВОИС по количеству ВОИЛ и размещению их на контролируемых площадях, а также аппаратуры ввода оптического излучения в линии и последующего съема сигналов из них³ [14].

¹ Рубичев Н. А. Измерительные информационные системы : учеб. пособие. М. : Дрофа, 2010. 334 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19594543> (дата обращения: 13.09.2022).

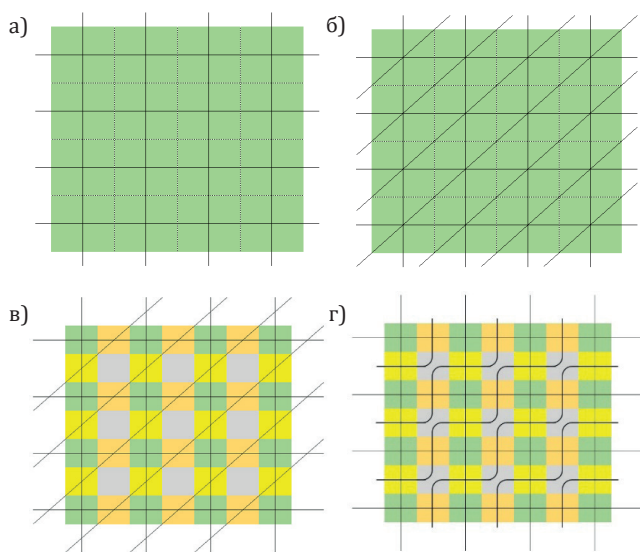
² Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М. : Физматлит, 2001. 272 с.

³ Сейсмические средства обнаружения. Теория и практика построения : монография / И. Н. Крюков, В. А. Иванов, Л. И. Двойрис [и др.] ; ред. Крюков И. Н. М. : Радиотехника, 2014. 215 с.



Последнее ограничение связано с необходимостью локализации систем сбора и обработки информации вместе с устройствами ввода оптического излучения в ВОИЛ. Ограничение по размещению накладывает условия как на геометрию укладки реальных волоконно-оптических кабелей, так и на их окружение: грунт, природные и техногенные дефекты в нем, а также пересечения с другими кабелями. В контексте настоящей статьи они не конфликтуют с предлагаемыми укладками и пока не рассматриваются. Предлагаемые схемы укладок направлены на уменьшение количества ВОИЛ при улучшении качества решения ВОТЗ [12].

На рисунке 1в и 1г изображены схемы укладок ВОИЛ, которые впервые были предложены в работе [15]. Однако, в этой работе не учитываются внешние факторы, особенности сигналов и другие граничные условия [16]. Их учет в сравнении с другими схемами укладок ВОИЛ, изображенными на рисунке 1, позволяет, в зависимости от решаемой задачи, достичь покрытия с помощью РВОИС большей площади контролируемой зоны при использовании меньшего количества измерительных линий, или получить другой результат: увеличить пространственное разрешение за счет более частой укладки этих линий. В сравнении схемы укладки ВОИЛ по трем направлениям со смещением диагональных линий, уложенных зигзагообразным образом (рисунок 1г), со схемой укладки ВОИЛ по трем направлениям со смещением диагональных линий (рисунок 1в), первая устраняет недостаток, связанный с появлением слепых зон (чувствительные области без ВОИЛ).



Р и с. 1. Варианты схем укладок ВОИЛ для РВОИС:

- а – взаимно-перпендикулярная; б – классическая для ВОТЗ по трем направлениям; в – схема по трем направлениям со смещением; г – схема со смещением и зигзагообразным размещением диагонального направления

Fig. 1. Variants of FOML stacking schemes for RFOMS:

- a) mutually perpendicular; б) classic three-way fiber optic communication line; в) offset three-way pattern; г) scheme with offset and zigzag placement of the diagonal direction

Для оценки перспективности представленной схемы укладки ВОИЛ по трем направлениям со смещением диагональных линий, уложенных зигзагообразным способом (рисунок 1г), рассмотрим её математическое описание.

Вычисление количества ЧЭ m и чувствительных областей (узлов) n на основе l горизонтальных и k вертикальных линий РВОИС различается на три возможных варианта по трем характерным особенностям их взаимного расположения [15]:

1. Первый узел (элемент матрицы 11) и последний узел (элемент матрицы lk) РВОИС перекрываются горизонтальной и вертикальной линиями (ЧЭ начинаются и заканчиваются элементами как показано на рис. 1г):

$$\begin{aligned} n &= (2l - 1)(2k - 1) \\ m &= 2(l + k - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

2. Первый узел РВОИС перекрывается горизонтальной и вертикальной линиями, последний – горизонтальной (либо вертикальной) и диагональной линией (ЧЭ начинаются с элементов как в п.1, но заканчиваются ЧЭ матрицы п.1 без последней вертикальной или горизонтальной строки). В таком варианте укладки ВОИЛ одна диагональная линия проходит только через один узел, применение которой с практической точки зрения нецелесообразно. Таким образом, количества узлов n и количества ВОИЛ m вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} n &= 2l(2k - 1) \text{ или } 2k(2l - 1) \\ m &= 2(l + k - 1) \end{aligned} \quad (4)$$

3. Первый узел РВОИС перекрывается горизонтальной и вертикальной линиями, а последний – пустой, перед которым диагональная линия (ЧЭ начинаются с элементов как в п.1, но заканчиваются ЧЭ матрицы п.1 без последней вертикальной или горизонтальной строки):

$$\begin{aligned} n &= 4k \\ m &= 2(l + k) - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Матрица A – матрица размерности $m \times n$, где i -я строка m_i соответствует i -й ВОИЛ, а j -й столбец n_j соответствует порядковому номеру узла в расчёте «слева – направо, сверху – вниз». Элемент $a_{ij} = 1$, если i -я ВОИЛ участвует в образовании j -го узла. Например:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Вектор X – вектор размерности n , вектор B – вектор размерности m , равны соответственно:

$$B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ \dots \\ B_m \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (7)$$



Результаты моделирования

Для примера, рассмотрим практическую схему укладки РВОИС минимальной реальной размерности, состоящую из $l = 4$ горизонтальных ВОИЛ и $k = 4$ вертикальных линий РВОИС, уложенных по варианту, изображенному на рисунке 1г.

Согласно рассмотренным выше формулам, матрица A будет иметь 14 ЧЭ ($m = 14$), и 49 чувствительных областей ($n = 49$). Из (6) видно, что после явных представлений элементов a_{ij} матрица для рассматриваемого примера размерностью $A = (14 \times 49)$ принимает следующий явный вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Вектор X – вектор размерности 49×1 , и вектор B – вектор размерности 14×1 , имеют вид (7).

Подставив необходимые значения в формулу (2), вычисляется исходный вектор X , который описывает реконструированную картину внешнего физического воздействия:

$$X = BA^* \quad (8)$$

где A^* – псевдообратная матрица A .

Для получения граничных условий алгебраического решения ВОТЗ по состоянию интегральных проекций от РВОИС необходимо оценить худшее выявление полезного сигнала из потока данных с ЧЭ. Под этим в работе понимается принятие коэффициента δ отношения уровня полезного сигнала P к максимальному значению воздействия помех ζ , либо в превышении порогового значения. Уровень полезного сигнала определяется воздействиями на РВОИС человеком, группой людей или транспортным средством, а помехи – сейсмической активностью в областях чувствительности всех ВОИЛ, характером и состоянием грунта (в том числе в разные времена года и суток), появлением крупных животных или птиц, прохождением ЧЭ вблизи автомобильных и железнодорожных трасс и т.д. [14]. Указанное соотношение и пороговое значение должны быть оптимальными с точки зрения устойчивого детектирования и последующей обработки массивов сигналов: минимальными, но достаточными для стабильной работы системы мониторинга, без ложных сработок и пропуска искомым воздействий. Коэффициент вычисляется следующим образом:

$$\delta = \frac{P}{\zeta} \quad (9)$$

где δ – коэффициент отношения, безразмерная величина; P – значение полезного сигнала; ζ – значение помех.

Смысл алгоритма работы системы мониторинга РВОИС можно коротко описать следующим образом. После определения оптимального коэффициента δ и установки работы системы от него, в постоянном режиме идет сравнение значения максимального полезного сигнала с максимальным значением помехи. В случае превышения коэффициента δ система пере-

ходит в режим тревоги с указанием места воздействия. В случае нескольких значительных воздействий на неё за короткий промежуток времени происходит сравнение с уровнем помех; при превышении введенного коэффициента δ система переходит в режим тревоги с указанием мест воздействий. При работе системы по пороговому значению в постоянном режиме сравнивается значение воздействия с порогом; в случае превышения система переходит в режим тревоги с указанием мест воздействий. Принятие такого соотношения и порогового значения в работе производится опытным путем в зависимости от внешних условий применения системы для РВОИС, построенной на ВОИЛ с лазерными диодами на входе в ВС и оконечными интерференционными фильтрами фазовой модуляции света. В последующем для указанной оценки планируется построить экспертную систему [16, 17].

На рисунке 2 для иллюстрации работы системы мониторинга физического поля по приведенному алгоритму показаны две ситуационные модели воздействий на РВОИС с размерностью сторон 7×7 , формирующих 49 чувствительных областей: по пороговому значению при трех воздействиях (рисунок 2а) и по коэффициенту отношения уровня полезного сигнала к уровню помех при одном воздействии (рисунок 2б).

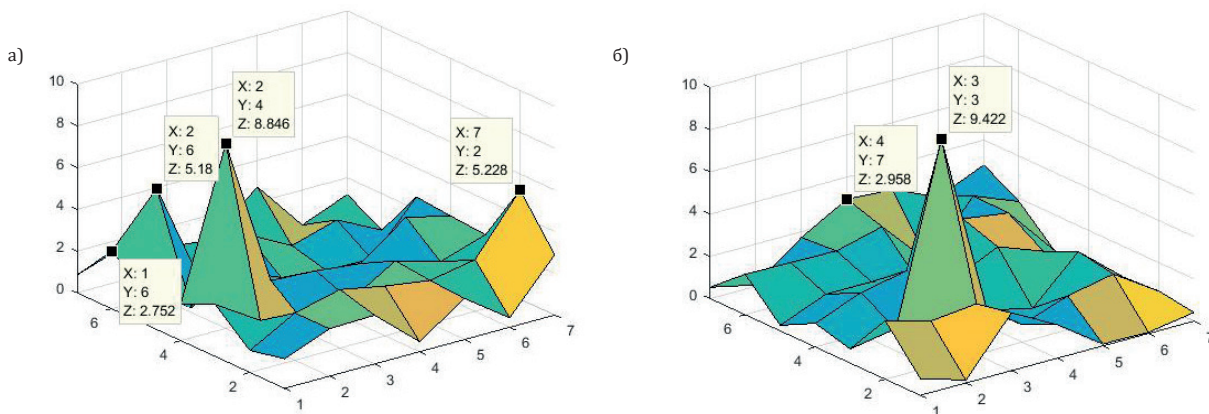
Первый случай соответствует схеме укладки ВОИЛ на РВОИС, указанной на рисунке 1г. В условиях моделирования наиболее оптимальное пороговое значение принято равным 3 единицам, уровень помехи для каждой области определяется случайным образом. Максимальный уровень помехи составляет 2,752 единицы, поэтому порог помехи на уровне 0,9 для коэффициента отношения принят равным 2,5 единицы.

Модель на рисунке 2а позволяет выявить воздействия на систему, критически близкие по значению к шумам ($\delta_{min} > 1,1$), что значительно повышает чувствительность системы. Учет возрастания риска возникновения ложных сработок планируется в дальнейшем реализовать в интеллектуальной настройке системы сбора и обработки информации [18]. Таким образом, представленный тип модели позволяет использовать систему мониторинга физических полей от РВОИС в условиях повышенного уровня помех.

Модель на рисунке 2б позволяет снизить порог чувствительности системы. Такой тип работы характерен для контролируемой местности с низким уровнем помех. За счет их низкого уровня достигается выявление даже незначительного воздействия на РВОИС. Кроме того, при этом также достигается отсутствие, либо крайне низкое количество, ложных сработок.

Результаты математического описания новой томографической схемы укладки ВОИЛ по трем направлениям со смещением диагональных линий, уложенных зигзагообразным способом, показывают, что выполнять восстановление подынтегральной функции можно исследованными способами для классических схем укладки ВОТЗ. При этом количество ВОИЛ предлагаемой схемы укладки (рисунок 1в и 1г) сравнимо с укладкой по двум направлениям и меньше числа точечных датчиков (рисунок 1а) на 77% и 81%, соответственно. По сравнению с классической схемой для решения ВОТЗ (рисунок 1б) выигрыш в количестве также существенен и составил 51% для разработанной схемы укладки [19-25].





Р и с. 2. Модели сигналов на РВОИС размерностью 7×7 (49 чувствительных областей):

- а) – модель трех сигналов с работой системы по пороговому значению;
б) – модель одного сигнала с работой системы по коэффициенту δ

F i g. 2. Models of signals on the RFOMS with a dimension of 7×7 (49 sensitive areas):

- а) three-signal model with system operation on a threshold value;
б) model of one signal with system operation by coefficient δ

Описанный подход малоракурсной волоконно-оптической томографической реконструкции исходного физического воздействия может быть использован для каждой из приведенных выше схем укладки ВОИЛ различной конфигурации (квадратная или прямоугольная) и размерности, а также обобщен на большие (в принципе – любые) размерности РВОИС. Ограничениями, помимо указанных выше, являются возможности распространения оптических сигналов до надежной регистрации их приемниками на выходах ВОИЛ.

Заключение

Представленное математическое описание справедливо для всех схем укладки ВОИЛ, указанных в настоящей статье. Для предложенных двух новых схем также справедливо использование известных методов решения классических ВОТЗ, что позволяет в зависимости от решаемой задачи, поставить вопрос об увеличении контролируемой площади без увеличения количества линий, либо о более точном указании места появления сигнала при сохранении размерности РВОИС.

Выявление полезного сигнала установкой порогового значения позволяет однозначно определять места воздействий на систему в условиях использования с достаточно высокими показателями шумовых помех. При помощи коэффициента

отношения система мониторинга сможет в автоматическом режиме подстраиваться под изменения условий применения, которые обусловлены низкими значениями помех и длительными периодами их изменения (сезонные, погодные условия, подвижность грунта, животные и птицы, прохождение вблизи автомобильных и железнодорожных трасс).

Применяя совместно описанный подход выявления полезного сигнала, новую томографическую схему укладки ВОИЛ по трем направлениям со смещением диагональных линий, уложенных зигзагообразным способом и программную обработку сигналов воздействий на поле, можно значительно сократить количество ЧЭ контролируемого пространства при сохранении количества чувствительных областей РВОИС, а также повысить качество восстановления исходного воздействия.

Направлением дальнейших научных исследований является проектирование РВОИС на основе предложенной схемы укладки ВОИЛ, с целью практического подтверждения полученных результатов, разработка и внедрение экспертной системы оценки уровня сигналов, исследование временных и ресурсных затрат, необходимых для восстановления исходных воздействий на реальные протяженные физические поля, сравнение результатов с другими алгоритмами восстановления, а также нахождение устойчивых решений при изменениях параметров как схем укладки, так и внешних воздействий.

Список использованных источников

- [1] Оптоэлектронная распределенная сигнальная система / Ю. Н. Кульчин [и др.] // Измерительная техника. 2005. № 7. С. 28-32. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18000931> (дата обращения: 13.09.2022).
- [2] Закасовская Е. В., Кульчин Ю. Н. Оптимизация алгоритма обработки информации в распределенных волоконно-оптических измерительных системах // Информатика и системы управления. 2010. № 4(26). С. 50-60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15337453> (дата обращения: 13.09.2022).
- [3] Кульчин Ю. Н., Закасовская Е. В. Применение последовательности комплексов нейронных сетей в распределенных волоконно-оптических измерительных системах // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 5-12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16524849> (дата обращения: 13.09.2022).



- [4] Крюков И. Н., Денисов И. В., Кипер А. В. Применение волоконно-оптических измерительных сетей мониторинга протяженных деформационных полей при построении территориально распределенных систем охраны // Радиотехника. 2017. № 1. С. 5-11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29423559> (дата обращения: 13.09.2022).
- [5] Использование методов реконструктивной вычислительной томографии в обработке сигналов волоконно-оптических датчиков / С. П. Гиневский, О. И. Котов, В. М. Николаев, В. Ю. Петрунькин // Квантовая электроника. 1995. Т. 22, № 10. С. 1013-1018. URL: <https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=514> (дата обращения: 13.09.2022).
- [6] О применении томографических методов в волоконно-оптических датчиках / О. И. Котов, А. В. Медведев, В. М. Николаев, В. Ю. Петрунькин // Письма в журнал технической физики. 1990. Т. 16, № 2. С. 90-94. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/25207> (дата обращения: 13.09.2022).
- [7] Holographic Neural Network for Processing of Signals of Distributed Optical Fiber Measuring Networks with the Topography Principle of Data Gathering / Yu. N. Kulchin [и др.] // Optical Memory and Neural Networks. 1997. Vol. 6, no. 2. P. 149-156.
- [8] Выбор алгебраических методов решения волоконно-оптической томографической задачи / И. В. Денисов [и др.] // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 1. С. 21-27. doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202201-04>
- [9] Kulchin Yu. N., Denisova E. V., Denisov I. V. Application of algebraic and neural-like methods for reconstruction of distribution functions of physical fields // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2003. Vol. 12, issue 4. P. 283-297. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48660344> (дата обращения: 13.09.2022).
- [10] Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography. Classics in Applied Mathematics. Vol. 32. Philadelphia, PA, USA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001. 226 p. doi: <https://doi.org/10.1137/1.9780898719284>
- [11] Herman G. T. Basis Functions in Image Reconstruction from Projections: A Tutorial Introduction // Sensing and Imaging. 2015. Vol. 16, issue 1. Article number: 6. doi: <https://doi.org/10.1007/s11220-015-0107-2>
- [12] Денисов И. В., Сонин А. Е. Постановка волоконно-оптической реконструктивной томографии протяженных физических полей // Радиотехника. 2018. № 2. С. 49-51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32881340> (дата обращения: 13.09.2022).
- [13] Бусурин В. И., Семенов А. С., Удалов Н. П. Оптические и волоконно-оптические датчики // Квантовая электроника. 1985. Т. 12, № 5. С. 901-944. URL: <https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=7053> (дата обращения: 13.09.2022).
- [14] Двойрис Л. И., Иванов В. А., Крюков И. Н. Метод повышения помехоустойчивости сейсмических средств обнаружения // Радиотехника. 2019. № 2. С. 40-43. doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-201902-08>
- [15] Неравномерная схема укладки волоконно-оптических линий для томографического мониторинга морских конструкций / И. В. Денисов, Д. Н. Пискун, Н. А. Седова, В. А. Седов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-3(54). С. 120-127. doi: <https://doi.org/10.37220/МИТ.2021.54.4.098>
- [16] Елисеев А. В., Музыченко Н. Ю., Ройбу М. О. Алгоритм построения функции принадлежности путем статистической обработки экспертных оценок // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14, № 11. С. 64-68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472095> (дата обращения: 13.09.2022).
- [17] Денисов И. В., Кипер А. В. Оптоэлектронные интеллектуальные комплексы для мониторинга состояния протяженных физических полей // Радиотехника. 2013. № 2. С. 77-79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18894456> (дата обращения: 13.09.2022).
- [18] Hendin O., Horn D., Hopfield J. J. Decomposition of a mixture of signals in a model of the olfactory bulb // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1994. Vol. 91, issue 13. P. 5942-5946. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.13.5942>
- [19] Markel V. A., Schotland J. C. Inverse problem in optical diffusion tomography. II. Role of boundary conditions // Journal of the Optical Society of America A. 2002. Vol. 19, issue 3. P. 558-566. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.19.000558>
- [20] Zakasovskaya E. V., Tarasov V. S. Optical fiber imaging based tomography reconstruction from limited data // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2018. Vol. 328. P. 542-553. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.09.011>
- [21] Measurement and visualization of strains and cracks in CFRP post-tensioned fiber reinforced concrete beams using distributed fiber optic sensors / X. Tan [и др.] // Automation in Construction. 2021. Vol. 124. Article number: 103604. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103604>
- [22] Scupi A. A. The use of numerical programs in research and academic institutions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 145, no. 8. Article number: 082002. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/8/082002>
- [23] Detecting weak acoustic fields by multichannel fiber-optical sensory system / R. V. Romashko [и др.] // Proceedings of SPIE 10176, Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics. SPIE, 2016. Article number: 1017612. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2268124>
- [24] Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel / M. Kulpa [и др.] // Measurement. 2021. Vol. 175. Article number: 109099. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109099>
- [25] Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G. Measurement of strain and temperature by fiber-optic sensors embedded into samples manufactured by additive technology // Procedia Structural Integrity. 2022. Vol. 42. P. 307-314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.038>

Поступила 13.09.2022; одобрена после рецензирования 03.11.2022; принята к публикации 27.11.2022.



Об авторах:

Денисов Игорь Викторович, профессор Института физико-математических наук и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0195-6082>, igordenisov@inbox.ru

Пискун Дмитрий Николаевич, аспирант, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-6421>, nomid_92@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

1. Kul'chin Y.N., Denisov I.V., Kirichenko O.V., Sedov V.A., Rybal'chenko N.A. Distributed Optoelectronic Signal System. *Measurement Techniques*. 2005;48(7):668-674. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0202-1>
2. Zakasovskaya E.V., Kulchin Yu.N. Optimization of the information processing algorithm in distributed fiber-optical measuring systems. *Information Science and Control Systems*. 2010;(4):50-60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15337453> (accessed 13.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kulchin Yu.N., Zakasovskaya E.V. Application of Neural Networks Complexes in the Distributed Fiber-Optical Measuring Systems. *Problemy Upravleniya = Control Sciences*. 2011;(4):5-12. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16524849> (accessed 13.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kryukov I.N., Denisov I.V., Kiper A.V. The use of fiber-optic measurement of extended monitoring networks deformation fields in the construction of geographically distributed systems of protection. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2017;(1):5-11. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29423559> (accessed 13.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Ginevskii S.P., Kotov O.I., Nikolaev V.M., Petrun'kin V.Yu. Use of reconstructive computerised tomography methods in fibre-optic sensors. *Quantum Electronics*. 1995;25(10):978. doi: <https://doi.org/10.1070/QE1995v025n10ABEH000514>
6. Kotov O.I., Medvedev A.V., Nikolaev V.M., Petrun'kin V.Yu. [Application of tomographic methods in fiber-optic sensors]. *Applied Physics Letters*. 1990;16(2):90-94. Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/25207> (accessed 13.09.2022). (In Russ.)
7. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Petrov Yu.S., Kirichenko O.V., Kamenev O.T., Romashko R.V., Denisov I.V. Holographic Neural Network for Processing of Signals of Distributed Optical Fiber Measuring Networks with the Topography Principle of Data Gathering. *Optical Memory and Neural Networks*. 1997;6(2):149-156.
8. Denisov I.V., Sedov V.A., Sedova N.A., Piskun D.N., Kiper A.V. Selection of algebraic methods for solving of the fiber-optical tomographic problem. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2022;86(1):21-27. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202201-04>
9. Kulchin Yu.N., Denisova E.V., Denisov I.V. Application of algebraic and neural-like methods for reconstruction of distribution functions of physical fields. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. 2003;12(4):283-297. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48660344> (accessed 13.09.2022).
10. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography. In: *Classics in Applied Mathematics*. Vol. 32. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2001. 226 p. doi: <https://doi.org/10.1137/1.9780898719284>
11. Herman G.T. Basis Functions in Image Reconstruction from Projections: A Tutorial Introduction. *Sensing and Imaging*. 2015;16(1):6. doi: <https://doi.org/10.1007/s11220-015-0107-2>
12. Denisov I.V., Sonin A.E. Definition of the fiber-optical reconstructive tomography for distributed physical fields. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2018;(2):49-51. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32881340> (accessed 13.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Busurin V.I., Semenov A.S., Udalov N.P. Optical and fiber-optic sensors (review). *Soviet Journal of Quantum Electronics*. 1985;15(5):595-621. doi: <https://doi.org/10.1070/QE1985v015n05ABEH007053>
14. Dvoiris L.I., Ivanov V.A., Kryukov I.N. Method of increasing noise immunity of seismic detection means. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2019;(2):40-43. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-201902-08>
15. Denisov I.V., Piskun D.N., Sedova N.A., Sedov V.A. Irregular layout of fiber-optical lines for tomographic monitoring of nautical structures. *Marine Intellectual Technologies*. 2021;(4-3):120-127. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.098>
16. Eliseev A.V., Muzychenko N.Ju., Roibu M.O. The algorithm for constructing membership functions by statistical processing of expert estimates. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and Control Systems*. 2016;14(11):64-68. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472095> (accessed 13.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Denisov I.V., Kiper A.V. Optoelectronic intellectual complexes for monitoring of extended physical fields. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2013;(2):77-79. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18894456> (accessed 13.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Hendin O., Horn D., Hopfield J.J. Decomposition of a mixture of signals in a model of the olfactory bulb. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1994;91(13):5942-5946. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.13.5942>



19. Markel V.A., Schotland J.C. Inverse problem in optical diffusion tomography. II. Role of boundary conditions. *Journal of the Optical Society of America A*. 2002;19(3):558-566. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.19.000558>
20. Zakasovskaya E.V., Tarasov V.S. Optical fiber imaging based tomography reconstruction from limited data. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018;328:542-553. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.09.011>
21. Tan X., Abu-Obeidah A., Bao T., Nassif H., Nasreddine W. Measurement and visualization of strains and cracks in CFRP post-tensioned fiber reinforced concrete beams using distributed fiber optic sensors. *Automation in Construction*. 2021;124:103604. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103604>
22. Scupi A.A. The use of numerical programs in research and academic institutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;145(8):082002. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/8/082002>
23. Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Storozhenko D.A., Kulchin Yu.N. Detecting weak acoustic fields by multichannel fiber-optical sensory system. In: Proceedings of SPIE 10176, Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics. SPIE; 2016. Article number: 1017612. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2268124>
24. Kulpa M., Howiacki T., Wiater A., Siwowski T., Sieńko R. Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel. *Measurement*. 2021;175:109099. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109099>
25. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G. Measurement of strain and temperature by fiber-optic sensors embedded into samples manufactured by additive technology. *Procedia Structural Integrity*. 2022;42:307-314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.038>

Submitted 13.09.2022; approved after reviewing 03.11.2022; accepted for publication 27.11.2022.

About the authors:

Igor V. Denisov, Professor of The Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14 Nevskogo St., Kaliningrad 236016, Russian Federation), Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0195-6082>**, igordenisov@inbox.ru

Dmitriy N. Piskun, Postgraduate Student, Immanuel Kant Baltic Federal University (14 Nevskogo St., Kaliningrad 236016, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-6421>**, nomid_92@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

