

25. Датчик измерения фазовых искажений волновых фронтов на основе оптического коррелятора с компьютерно-синтезированным голографическим фильтром

М. С. Ковалев¹, Г. К. Красин¹, П. А. Ручка¹, Е. Ю. Злоказов^{1,2}, С. Б. Одинокоев¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Описан алгоритм, который позволяет в автоматическом режиме вычислять aberrации в предложенной авторами ранее схеме голографического датчика волнового фронта, позволяющей измерять aberrации на основе итерационного вывода голограмм на фазовый пространственный модулятор света (ПМС). Приведена практическая реализация данного алгоритма на основе обратной связи камеры и ПМС. С использованием предлагаемого алгоритма измерены различные aberrации с точностью $\lambda/160$.

Ключевые слова: Компьютерная голография, Голограмма Фурье, Измерение волнового фронта, Датчик волнового фронта, Корреляционное детектирование.

Цитирование: **Ковалев, М. С.** Датчик измерения фазовых искажений волновых фронтов на основе оптического коррелятора с компьютерно-синтезированным голографическим фильтром / М. С. Ковалев, Г. К. Красин, П. А. Ручка, Е. Ю. Злоказов, С. Б. Одинокоев // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 130–138.

1. Введение

Исследования лазерных волновых полей сегодня актуальны, поскольку они могут помочь решить многие исследовательские и прикладные задачи в области современных систем фотоники. Во-первых, это задачи оптической метрологии, в которых должны быть определены некоторые физические характеристики объекта. Это такие характеристики [1–6] как форма поверхности, показатель преломления, оптическая толщина и т. д. Характеристики необходимы для создания точных оптических систем и устройств [7–9] и могут быть определены с помощью измеренных параметров оптической волны от источника излучения, который прошел через объект или отразился от его поверхности. Во-вторых, есть задачи, которые содержат определение характеристик оптического излучения, образованного некоторыми внешними источниками. Эти задачи предшествовали в лазерной физике, где тесты контроля качества необходимы после генерации лазерных лучей [8] и при построении различных адаптивных систем. Кроме того, при решении определенных технических задач необходимо сформировать волновое поле с требуемыми пространственными характеристиками [2, 10–12].

Основной проблемой в исследовании лазерных волновых полей является регистрация их пространственного распределения амплитудно-фазового распределения, поскольку устрой-

ства, которые измеряют прямолинейные фазовые искажения, еще не были изобретены. Конечно, в настоящее время существуют некоторые методы, позволяющие зарегистрировать профиль фазового фронта и изучить волновое поле, образованное различными источниками света. Наиболее развитыми устройствами являются интерферометры [6] и датчики, основанные на методах Гартмана [13–14] и Шака — Гартмана. Самые ценные результаты в исследовании лазерных волновых полей были получены с помощью различных интерферометров. Однако они могут определять только разность фаз двух когерентных световых пучков. Один из них — эталонный луч, что существенно ограничивает область их применения. Другие фазометрические методы намного хуже по точности с интерферометрическими, а также не дают удовлетворительного решения задачи записи оптического волнового поля. В результате все еще популярна задача изобретения альтернативных методов измерения фазовых искажений светового поля.

В качестве перспективной альтернативы предлагается использовать голографический датчик волнового фронта (ГДВФ). При этом голограммная структура используется для разложения волнового фронта по абберрационным компонентам и позволяет заменить более дорогие и технологически сложные компоненты датчика Шака — Гартмана. В основе голограммных структур лежат голограммы Фурье, которые требуют вычисления преобразования Фурье или голограммы Френеля, для которых необходимо вычисление дифракционного интеграла в каждой точке распределения интенсивности светового поля в плоскости голограммы. Метод измерения ВФ основывается на принципе восстановления фазы световой волны от зарегистрированной на голограммной структуре интерференционной картины.

В настоящей статье для отображения цифрового синтезированного голографического изображения в ГДВФ используется отражающий ПМС фазового типа. Компьютерная голограмма Фурье специально рассчитана для формирования заранее определенного отклика (например, функции корреляции), когда модель закодированного волнового фронта соответствует функции волнового фронта луча, падающего на вход ГДВФ. Во время измерения волны неизвестной формы функция КСГ аппроксимируется с помощью цифровой постобработки оптических откликов, снятых матричным фотодетектором (ПЗС, КМОП и т. д.) и корректировки весовых коэффициентов ортогонального базисного выражения модели волнового фронта в КСГ. Максимизация оптического корреляционного отклика в +1 дифракционном порядке может использоваться в качестве контрольной функции в алгоритмах аппроксимации.

2. Принцип работы голографического датчика волнового фронта с корреляционным детектированием различных аббераций

В работах [40, 41] была предложена схема ГДВФ, который измеряет искажения волнового фронта на основе компьютерно-синтезированных голограмм Фурье. Детектирование фазовых искажений, присутствующих в лазерном пучке, осуществляется с помощью специальной голограммы Фурье, которая представляет собой результат интерференции двух волн. На ри-

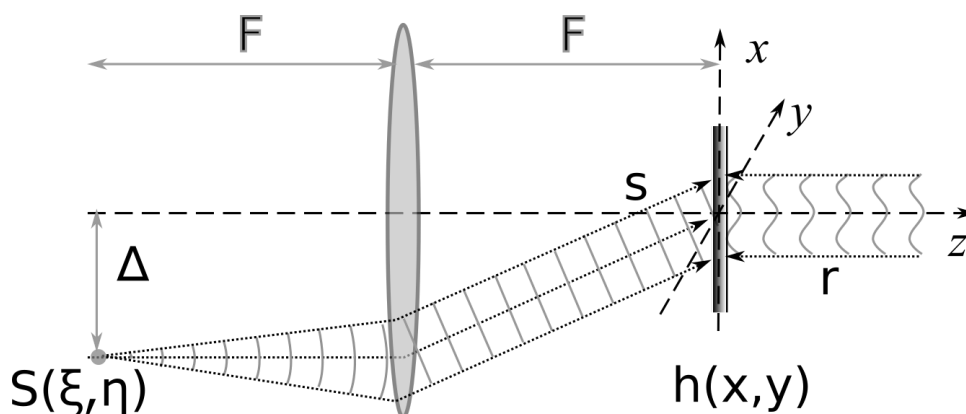


Рис. 1. Эквивалентная схема записи амплитудной голограммы Фурье

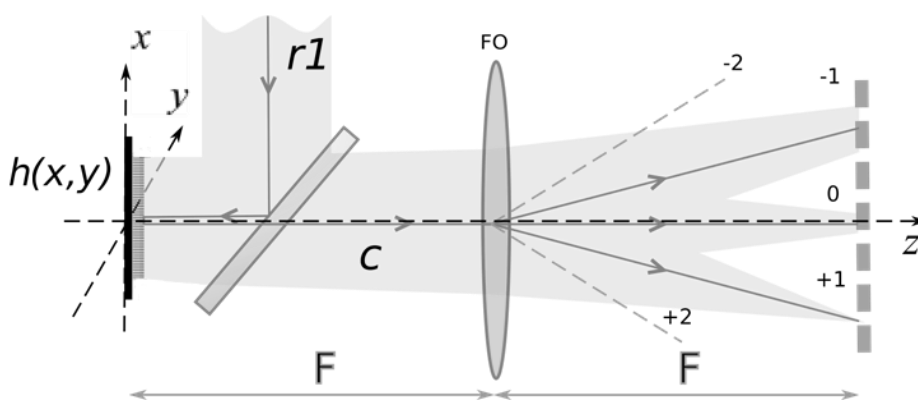


Рис. 2. Оптическая схема восстановления голограммы Фурье при падении на нее лазерного пучка с фазовыми искажениями

сунке 1 представлена схема синтеза такой голограммы. Первая, предметная волна, формируется с использованием точечного источника S , смещенного относительно оптической оси на величину Δ . Сферическая волна, исходящая от источника, подвергается Фурье-преобразованию и падает на фоточувствительную пластинку h . Вторая, опорная волна r , представляет собой когерентный пучок единичной амплитуды с фазовым множителем $f_{ref}(x, y)$, который представляет собой функцию, описывающую абберации, внесенную в опорную волну.

При восстановлении голограммы Фурье лазерным пучком с фазовыми искажениями, излучение, дифрагированное на несколько порядков, регистрируется камерой, которая стоит в задней фокальной плоскости Фурье-объектива (рисунок 2). По интенсивности и размеру данных порядков дифракции можно судить о наличии и величине абберации, содержащейся в падающем пучке. Однако, для прецизионного измерения удобнее работать не с аналоговыми голограммами Фурье, которые могут вносить свои погрешности и нелинейности при записи, а рассчитывать компьютерно-синтезированные голограммы Фурье и выводить их на ПМС для существенного уменьшения погрешности определения фазовых искажений.

Функция пропускания КСГ может быть рассчитана как квадрат суммы комплексных амплитуд предметной и опорной волн. Запишем нормированную функцию пропускания голограммы, которая отображается на фазовом ПМС:

$$h_{ph}(x, y) \approx \exp \left\{ i\pi \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{F} x - f_{ref}(x, y) \right) \right] \right\},$$

где F — фокусное расстояние Фурье-объектива, λ — длина волны.

Согласно формуле Якоби — Ангера [42] можно преобразовать указанное выше выражение как сумму взвешенных функций Бесселя 1-го рода n -го порядка. Тогда при падении измеряемого лазерного пучка $t(x, y) = \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} f(x, y) \right]$ с неизвестной aberrацией $f(x, y)$ на фазовый ПМС, на который выводится голограмма, получится следующее распределение:

$$\begin{aligned} c(x, y) &= t(x, y)h_{ph}(x, y) = \\ &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} i^n J_n(\pi) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{n\Delta}{F} x \right) \right] r_n^*(x, y)t(x, y), \end{aligned}$$

где $r_n^*(x, y) = \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} n f_{ref}(x, y) \right]$ — опорная волна,

$J_n(\pi)$ — взвешенные функции Бесселя 1-го рода.

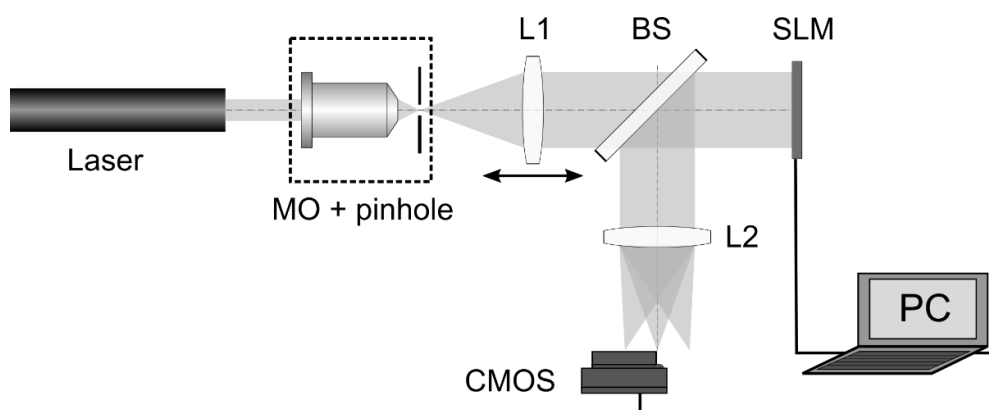
Пространственный модулятор света установлен в передней фокальной плоскости объектива, где формируется световое поле, комплексная амплитуда которого описывается Фурье-преобразованием комплексной амплитуды падающего на объектив поля. В задней фокальной плоскости Фурье-объектива установлена КМОП-камера, которая регистрирует следующее распределение интенсивности излучения:

$$\begin{aligned} |C(\xi, \eta)|^2 &\approx |\tilde{\mathcal{F}}^{-1}[c(x, y)]|^2 \approx \\ &\approx \left| \sum_{n \in \mathbb{Z}} i^n J_n(\pi) [R_n(\xi - n\Delta, \eta)] \otimes T(\xi - n\Delta, \eta) \right|^2, \end{aligned}$$

где $\tilde{\mathcal{F}}$ — оператор преобразования Фурье, $T(\xi, \eta)$ и $R_n(\xi, \eta)$ — Фурье-образы от функций $t(x, y)$ и $r_n(x, y)$ соответственно, а \otimes — знак кросс-корреляции.

Таким образом, при выводе КСГ на ПМС независимо от конкретной амплитуды соответствующих фазовых искажений в aberrационной модели в плоскости регистрации можно будет наблюдать корреляционный отклик в порядках дифракции [43]. Пространственное распределение интенсивности отклика в плоскости регистрации и его положение, т. е. порядок дифракции, в котором наблюдается отклик, будут изменяться в зависимости от соотношения амплитуд волновых aberrаций, кодируемых в КСГ, и амплитуд aberrаций в пучке, падающем на ПМС.

При совпадении амплитуд искажений в падающем на пространственный модулятор световом пучке и в функции, описывающей aberrации в КСГ, в плоскости регистрирующей матрицы в плюс 1 порядке дифракции будет наблюдаться острый пик, амплитуда которого будет соответствовать теоретическому пределу для автокорреляции в данной системе. Важно отметить, что поскольку при синтезе голограммы в качестве объектной волны используется точечный источник света, то корреляционный отклик по своему распределению является изображением функции рассеяния точки данной оптической системы. Это обстоятельство обуславливает также то, что при несовпадении aberrаций в пучке и в голограмме, картина в плюс



МО — микрообъектив, pinhole — точечная диафрагма, L1 — линза на моторизированной платформе, BS — делитель пучка, SLM — пространственный модулятор света, L2 — Фурье-объектив, CMOS — КМОП-камера

Рис. 3. Схема экспериментальной установки для автоматической оценки дефокусировки в системе

1 порядке соответствует виду функции рассеяния точки для соответствующих фазовых искажений. Таким образом, при рассмотрении картины в плюс 1 порядке можно корректировать КСГ на ПМС для получения идеального корреляционного отклика.

3. Описание датчика измерения фазовых искажений волновых фронтов на основе оптического коррелятора с компьютерно-синтезированным голографическим фильтром

На рисунке 3 показана оптическая схема экспериментальной установки, которая позволяет реализовать автоматическое корреляционное детектирование искажений волнового фронта, используя компьютерно-синтезированные голограммы, выводимые на фазовый пространственный модулятор света отражательного типа. Для контрольных измерений была выбрана aberrация дефокусировки, так как ее весьма просто можно ввести в схему физически — перемещением какого-либо оптического элемента вдоль оптической оси.

В экспериментальной схеме излучение He-Ne лазера (632,8 нм) проходило через микрообъектив и точечную диафрагму и попадало на коллимирующую линзу L1 ($f_1 = 75$ мм), установленную на моторизированную платформу для линейного перемещения Standa 8MT173-20-50. Далее коллимированный пучок, проходя через светоделительную пластину BS, попадал на фазовый модулятор света HOLOEYE Pluto 1920×1080 (шаг пикселей — 8 мкм). Затем пучок падал на Фурье-преобразующую линзу L2 ($f_2 = 1\ 000$ мм), формирующую 0 и ± 1 дифракционные порядки. КМОП-камера Thorlabs CS2100M-USB (1920×1080) была установлена так, что в плоскость изображения попадал только +1 дифракционный порядок.

Для экспериментального исследования возможностей разработанного алгоритма установка была доработана посредством введения связи через подключение ПМС и камеры к одному компьютеру.

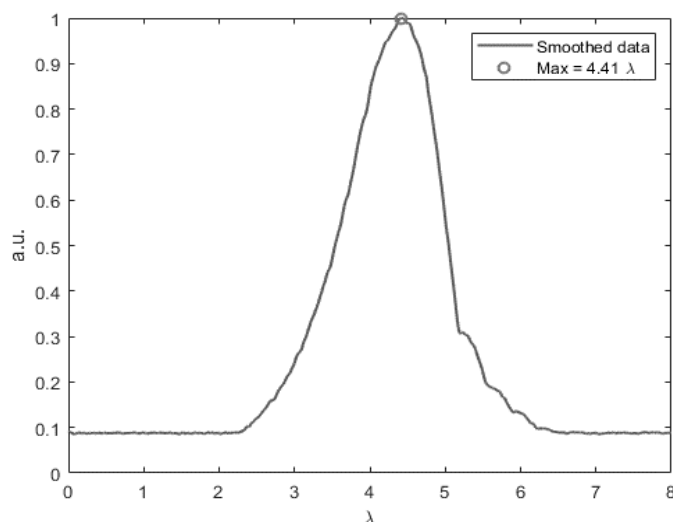


Рис. 4. График нормированной целевой функции для абберации дефокусировки с амплитудой $4,41 \lambda$, полученный путем отображения голограмм с шагом абберации $0,01 \lambda$. Для уменьшения влияния шумов камеры функция была сглажена с помощью локальной регрессии

На экспериментальной установке путем перемещения линзы L1 была создана дефокусировка величиной $4,41 \lambda$. Такое значение обусловлено в том числе дискретным шагом моторизованной платформы. Для проверки установленной величины абберации мы провели предварительный эксперимент: были синтезированы голограммы с шагом $0,01 \lambda$, которые последовательно отображались на ПМС. Результат регистрации амплитуды корреляционного пика в плоскости камеры для этого эксперимента показан на рисунке 4. Таким образом, истинное значение абберации было верифицировано путем простого перебора.

После предварительного эксперимента на ПК был запущен предлагаемый алгоритм. Для грубой оценки было синтезировано 38 голограмм, амплитуда абберации в которых менялась с шагом $0,4 \lambda$ в диапазоне $(0-15) \lambda$. Голограммы выводились на пространственный модулятор света последовательно. Частота смены кадров модулятора — 60 Гц. Массив изображения корреляционного отклика с КМОП-камеры подавался на вход вычислительного цикла, который оценивал максимум корреляционной функции для каждой конкретной голограммы. После отображения всех голограмм из массива выбирался максимум и следующая за ним по амплитуде точка. Эти точки образовывали интервал для локальной оптимизации и точного вычисления абберации.

Для точной оценки величины абберации на полученном интервале был использован метод Нелдера — Мида [25]. Данный метод обладает хорошей устойчивостью к шумам, а также позволяет найти экстремум за небольшое количество итераций.

4. Обсуждение результатов

В результате серии экспериментов было получено среднее значение аберрации $4,41375 \lambda$. Таким образом, абсолютная погрешность метода составила $0,00375 \lambda$, что приблизительно соответствует $\lambda/260$. Относительная погрешность метода при таком результате — $0,085 \%$. Данные показатели точности существенно превосходят таковые у интерферометрических аналогов и типичных моделей датчиков Шака — Гартмана.

Также стоит отметить весьма значительное влияние шумов регистрирующей системы, что не позволяло проводить измерения по одному кадру и не использовать усреднение, не теряя при этом в точности. Так, при сигнале на уровне $250\text{--}255$ градации серого, шум составлял $15\text{--}20$ уровней серого, что эквивалентно 10% погрешности. Этот факт можно наблюдать и на рисунке 4. В нашем эксперименте без усреднения удалось достичь точности определения дефокусировки лишь $\lambda/50$. Однако данное ограничение носит фундаментальный характер и при отсутствии того или иного вида фильтрации будет ограничивать точность любого метода, основывающегося на оценке амплитуды корреляционного отклика той или иной картины в плоскости регистрации.

При исключении амплитудного шума камеры существует возможность увеличить шаг грубого поиска. Так, при увеличении шага до $0,6 \lambda$ количество голограмм для отображения сократится до 25 , что позволит на 30% быстрее вычислять интервал для точного поиска. Сходимость алгоритма точного поиска также существенно повысится при уменьшении влияния шумов, иными словами, количество итераций для определения одной аберрации сократится. В нашем эксперименте точное положение экстремума удавалось определить в среднем за 15 итераций, тогда как при отсутствии шума (на теоретической кривой) число итераций сокращалось вдвое.

5. Заключение

В данной работе был предложен алгоритм автоматического вычисления волновых аберраций лазерного пучка в схеме голографического датчика волнового фронта. Была предложена модификация схемы, позволившая реализовать такой алгоритм на практике. Теоретически показано, что вычисление аберраций можно проводить в два этапа: на первом этапе осуществляется грубая оценка интервала, содержащего искомое значение аберрации, а на втором этапе происходит точная оценка значения аберрации на основе методов локальной оптимизации целевой функции. Данный подход проверен экспериментально при измерении дефокусировки, механически вводимой в схему путем перемещения линзы на моторизированной платформе, а полученная низкая погрешность подтверждает работоспособность предложенного подхода. Было показано, что при использовании усреднения по 10 кадрам, возможно получить точность определения аберрации порядка $\lambda/260$, а при работе по одному кадру — $\lambda/50$.

Апробация метода на большом количестве волновых aberrаций, характеризующимися полиномами Цернике, осложняется необходимостью введения в схему отдельного устройства, способного имитировать различные фазовые искажения. Таким устройством может быть адаптивное зеркало или фазовый модулятор с глубиной модуляции, превышающей 2π .

Стоит отметить, что существует возможность применения более сложных способов оптимизации, например, метода роя частиц [26], которые могут показать существенно лучшие результаты по быстродействию, не требуя при этом выполнения предварительной грубой оценки. Практическая реализация подобных алгоритмов затруднительна для рассматриваемой задачи корреляционного детектирования на основе компьютерно-синтезированных голограмм и требует проведения отдельных экспериментов, однако использование столь гибких и комплексных методов глобальной оптимизации является весьма перспективным направлением исследований.

Список источников

- [1] L. Freisem, G. S. M. Jansen, D. Rudolf, K. S. E. Eikema, and S. Witte // *Opt. Express*. — 2018. — Vol. 26. — № 6. — P. 6860. — DOI:10.1364/OE.26.006860.
- [2] Zhigang Jia, Kai Xu, and Fengzhou Fang // *Opt. Express*. — 2017. — Vol. 25. — № 18. — P. 22125. — DOI:10.1364/OE.25.022125.
- [3] Boer Zhu, Xiangzhao Wang, Sikun Li, Guanyong Yan, Lina Shen, and Lifeng Duan // *Appl. Opt.* — 2016. — Vol. 55. — № 12. — P. 3192. — DOI:10.1364/AO.55.003192
- [4] O. Azucena, J. Crest, J. Cao, W. Sullivan, P. Kner, D. Gavel, D. Dillon, S. Olivier, and J. Kubby // *Opt. Express*. — 2010. — Vol. 18. — № 16 — P. 17521. — DOI:10.1364/OE.18.017521.
- [5] Cornelis, C. de Visser and M. Verhaegen // *J. Opt. Soc. Am. A*. — 2013. — Vol. 30. — № 1. — P. 82. — DOI:10.1364/JOSAA.30.000082.
- [6] M. A. A. Neil, M. J. Booth, and T. Wilson // *J. Opt. Soc. Am. A*. — 2000. — Vol. 17. — № 6. — P. 1098. — DOI:10.1364/JOSAA.17.001098.
- [7] F. Ghebremichael, G. Andersen, and K. Gurley // *Appl. Opt.* — 2008. — Vol. 47. — P. A62. Doi 10.1364/AO.47.000A62.
- [8] G. Andersen, L. Dussan, F. Ghebremichael, and K. Chen // *Opt. Eng.* — 2009. — Vol. 48. — P. 085801. — DOI:10.1364/AO.49.005117.
- [9] Liu Changhai, Xi Fengjie, Ma Haotong, Huang Shengyang, and Jiang Zongfu // *Appl. Opt.* — 2010. — Vol. 49. — P. 5117. — DOI:10.1364/AO.49.005117.
- [10] Shihao Dong, Tobias Haist, and Wolfgang Osten // *Appl. Opt.* — 2012. — Vol. 51. — P. 6268. Doi 10.1364/AO.51.001318.
- [11] A. Zepp, S. Gładysz, and K. Stein // *Adv. Opt. Techn.* — 2013. — Vol. 2. — № 5–6. — P. 433. — DOI:10.1515/aot-2013-0050.
- [12] Esdras Anzuola, Andreas Zepp, Szymon Gladysz, and Karin Stein // *Proc. of SPIE*. — 2016. — Vol. 9979. — P. 99790X. — DOI:10.1117/12.2236341.
- [13] V. Yu. Venediktov // *Photonics*. — 2016. — Vol. 55. — № 1. — P. 132.
- [14] G. K. Krasin, D. S. Lushnikov, S. B. Odinokov, A. B. Solomashenko, V. Yu. Venediktov and E. Yu. Zlokazov // *Proc. of SPIE*. — 2018. — Vol. 10787. — P. 107870D. — DOI:10.1117/12.2325437.
- [15] V. V. Orlov, V.Yu. Venediktov, A. V. Gorelaya, E. V. Shubenkova, and D. Z. Zhamalatdinov // *Optics & Laser Technology*. — 2019. — Vol. 116. — P. 214. — DOI:10.1016/j.optlastec.2019.03.028.

- [16] S. Dong, T. Haist, W. Osten, T. Ruppel, and O. Sawodny // *Appl. Opt.* — 2012. — Vol. 51. — № 9. — P. 1318. — DOI:10.1364/AO.51.001318.
- [17] S. Konwar and B. R. Boruah // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2019. — Vol. 36. — № 5. — P. 741. — DOI:10.1364/JOSAA.36.000741.
- [18] V. I. Bobrinev, M. L. Galkin, M. S. Kovalev, P. I. Malinina and S. B. Odinkov // *Optoelectronics, Instrumentation Data Process.* — 2018. — Vol. 54. — № 1. — P. 26. — DOI:10.3103/S8756699018010053.
- [19] M. S. Kovalev, G. K. Krasin, S. B. Odinkov, A. B. Solomashenko and E. Yu. Zlokazov // *Opt. Express.* — 2019. — Vol. 27. — № 2. — P. 1563. — DOI:10.1364/OE.27.001563.
- [20] M. S. Kovalev, G. K. Krasin, P. A. Nosov, S. B. Odinkov and I. Yu. Filippov // *IJAER.* — 2017. — Vol. 12. — № 23. — P. 13303.
- [21] Colton, David and Kress, Rainer. *Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory.* New York: Springer-Verlag. — 2013. — 406 p.
- [22] **Kumar, B.** *Correlation Pattern Recognition* / B. Kumar, A. Mahalanobis and R. Juday. — New York: Cambridge University Press, 2015. — 404 p.
- [23] Roger Fletcher. *Practical methods of optimization.* — New York: Wiley-Interscience, 2013. — 456 p.
- [24] J. Barzilai, J. M. Borwein // *IMA Journal of Numerical Analysis.* — 1988. — Vol. 8. — № 1. — P. 141. — DOI:10.1093/imanum/8.1.141.
- [25] J. A. Nelder, R. A. Mead // *The Computer Journal.* — 1965. — Vol. 7. — № 4. — P. 308. — DOI:10.1093/comjnl/7.4.308.