

## ОТЗЫВ

официального оппонента Захарова Валерия Павловича  
на диссертационную работу Маткивского Василия Александровича «Коррекция фазовых искажений и определение границ объекта в оптической когерентной томографии с использованием методов математической статистики и дифференциальной геометрии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — «Радиофизика»

Развитие интерферометрических методов регистрации оптического излучения позволило создать метод визуализации внутренних структур сложных многокомпонентных материалов известный как Оптическая когерентная томография (ОКТ). Данный метод нашел свое применение, в первую очередь, в офтальмологии, так как позволяет визуализировать внутреннюю структуру сетчатки глаза человека. В настоящее время данная технология находит все большее применение в биомедицинских исследованиях и медицинской практике (визуализация зубной эмали, барабанной перепонки, пищевода и многое другое).

Для эффективного использования оптической когерентной томографии требуется развитие методов ОКТ, обладающих существенно большей скоростью и позволяющих обеспечить визуализацию физиологических и функциональных параметров живой ткани, восстановление трехмерной топологии строения ткани. Немаловажным фактором при разработке и реализации является обеспечение высокого пространственного разрешения. Однако, во многих случаях ограничивающим фактором достижения предельных продольных разрешений спектральных ОКТ является дисперсия оптических характеристик исследуемых тканей, приводящие к искажению волновых фронтов. Ранее коррекция аберраций была доступна только с использованием техники адаптивной оптики, которая требует значительного усложнения оптической схемы. Поскольку в ОКТ осуществляется интерферометрическая регистрация излучения, то становится возможным получение информации о его фазе. Это позволяет извлекать различную дополнительную информацию об объекте исследования, в частности, осуществлять численную коррекцию влияния оптических аберраций. Данная задача особенно актуальна для офтальмологических приложений. Поскольку вычислительные мощности в настоящее время относительно доступны это ведет к существенному упрощению оптической составляющей установок и приборов за счет быстрой постобработки полученных данных, учитывающих как дисперсию и статистические особенности исследуемых сред, так и сложные геометрические параметры визуализируемых объектов. Поэтому актуальность исследования Маткивского В.А. не вызывает сомнения.

### **Краткий анализ структуры и содержания работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 114 страниц, 29 рисунков и список литературы, состоящий из 129 источников.

Во введении обоснована актуальность темы, показана научная новизна, изложены цель и задача исследования, сформулированы теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор различных способов получения изображений методом ОКТ. Рассмотрена проблема фазовой нестабильности и способы ее преодоления. Особое внимание уделено описанию существующих методов компенсации влияния материальной дисперсии и оптических аберраций на построение ОКТ-изображений. Обсуждены недостатки этих методов. Также рассмотрена задача автоматического определения

толщины барабанной перепонки по ОКТ-данным и методы ее решения, представленные в литературе.

Во второй главе Маткивским В.А. предложено использовать метод фазового градиентного автофокуса для компенсации влияния оптических aberrаций и материальной дисперсии среды. Данный метод представляет собой итерационный процесс выделения серии ярких структур на изображении и нахождения по ним оценок градиента фазы искажений, внесенных в Фурье-области ОКТ-изображения. Автором последовательно и детально представлены результаты численного моделирования и модельного эксперимента компенсации влияния aberrаций на установке цифровой голографии. Для случая компенсации влияния материальной дисперсии среды в спектральной ОКТ представлены результаты модельного эксперимента и эксперимента с глазом человека *in vivo*.

Один из наиболее интересных результатов работы автора представлен в третьей главе, где предложенный метод дополнен оценкой волновых aberrаций с использованием метода максимизации правдоподобия. Приведены результаты модельного эксперимента и эксперимента с глазом человека *in vivo*. Приведены результаты сравнения эффективности работы предложенного автором методом с методом поиска aberrаций, основанным на оптимизации метрики качества изображения.

В четвертой главе представлен алгоритм нахождения толщины барабанной перепонки на основе методов дифференциальной геометрии. Приведены результаты определения толщины нескольких барабанных перепонки, полученных *in vivo*.

#### **Научная новизна и практическая значимость исследований**

В целом можно констатировать, что к наиболее значимым результатам работы Матвиевского В.А., определяющей ее **новизну и научную значимость**, относятся разработанные автором численные методы увеличения поперечного разрешения ОКТ изображений путем численной компенсации влияния оптических aberrаций и восстановления продольного разрешения ОКТ изображений путем численной компенсации влияния материальной дисперсии, а именно

1. Метод численной компенсации оптических aberrаций в цифровой голографии и в полнопольной спектральной оптической когерентной томографии на основе фазового градиентного автофокуса.

2. Метод численной компенсации влияния материальной дисперсии среды при построении изображений методом спектральной оптической когерентной томографии с использованием фазового градиентного автофокуса и разложения по полиномам Цернике, исключая необходимость использования дополнительных измерений.

3. Метод автоматического определения толщины барабанной перепонки с учетом ее сложной геометрии, произвольной ориентации и наличия примыкающих объектов.

Особое внимание хотелось бы обратить на подробность и всесторонность проведенного анализа предложенных методов и алгоритмов обработки данных ОКТ, детальность их исследований, включая скрупулезные экспериментальные обоснования каждого факта и цифровых вычислительных процедур коррекции изображения. Это позволяет сделать однозначный вывод о **достоверности** полученных результатов исследований. Каждое научное положение и выводы диссертационной работы Матвиевского В.А., подтверждаются обширными и детальными исследованиями. Это позволяет сделать вывод о высокой степени **обоснованности** выносимых на защиту научных положений. Несомненным достижением является демонстрация применения разработанных методов *in vivo*, что говорит о высочайшей **практической** значимости работы автора.

При прочтении диссертации и автореферата сформулированы следующие замечания.

1. Предложенный автором метод компенсации аберраций базируется на ряде предположений, в частности на условии изопланатичности функции рассеяния точки (ФРТ), которое эквивалентно отсутствию зависимости от поперечных координат и постоянству волновой аберрации во всех частях изображения. Такое предположение достаточно естественно для офтальмологических приложений с оптически однородными средами, в которых отсутствуют пространственно-ориентированные структуры. Но даже для офтальмологических приложений это условие нарушается при больших аберрациях глаза и больших полях зрения. Однако никаких критериев применимости введенных ограничений автором не указано. Вместе с тем, при проведении экспериментов с большой численной апертурой именно нарушение условия постоянства ФРТ потребовало введения двухэтапной процедуры с предварительным выбором численно редуцированной апертуры для определения координат центров суб-изображений. В связи с этим непонятно каким образом для наперед неизвестного объекта исследований можно задать степень редуцирования апертуры для получения корректной оценки аберрации и компенсации изображения.
2. Автором используется разложение по полиномам Цернике до 14 радиальной степени при построении метода расчета волновой аберрации на основе статистической оценки максимума правдоподобия. Однако, известно, что учет высоких степеней полиномов Цернике ведет к нерациональному усилению шума в изображении, что подтвердили *in vivo* исследования глаза, представленные в диссертационной работе и показавшие ухудшение результатов определения волновой аберрации при использовании полиномов выше 8 порядка. Однако, в выводах диссертационной работы данное ограничение не указано.
3. Предложенный Маткивским В.А алгоритм определения толщины барабанной перепонки на основе метода Стегера функционально зависит от ряда параметров, которые влияют на его точность. В частности, размер ядра свертки влияет на точность обнаружения границы и, как следствие, может служить источником обнаружения ложных границ. Из материалов диссертационной работы не понятно на основании каких критериев задается данный параметр, либо используется его априорное значение. И нужно ли данное значение корректировать при каждом экспериментальном исследовании. Кроме того, стиль изложения сравнения предложенного алгоритма с широко известным методом определения границы Кэнни неудачен, т.к. отсутствует численное сравнение толщин барабанной перепонки и погрешностей их определения, измеренное с использованием обоих методов.
4. В тексте работы местами встречаются стилистические погрешности и пунктуационные ошибки (пропущенные или излишние запятые).

В то же время, отмеченные недостатки имеют частный характер и не оказывают существенного влияния на общее положительное впечатление от данной работы. Диссертация выполнена на высоком научно-методическом уровне, в работе существует оптимальный баланс между экспериментальными и теоретическими исследованиями.

Результаты работы апробированы на 6 международных и всероссийских профильных конференциях, их достоверность обусловлена применением известных верифицированных методов и подходов, а также хорошей воспроизводимостью данных, получаемых в статистически независимых экспериментах.

Материалы диссертационной работы представлены в 12 работах, большинство которых опубликовано в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science.

Автореферат полностью отражает содержание работы.

С учетом всего вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Маткивского Василия Александровича «Коррекция фазовых искажений и определение границ объекта в оптической когерентной томографии с использованием методов математической статистики и дифференциальной геометрии» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне и полностью соответствующей требованиям новизны, научно-практической значимости и достоверности, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года. Ее автор, В.А. Маткивский заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой лазерных и  
биотехнических систем  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева»

Захаров Валерий Павлович  
15 ноября 2021 г.

Адрес: 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д.34.  
Тел: +7 (846) 267-45-50, e-mail: [zakharov@ssau.ru](mailto:zakharov@ssau.ru)

