

ОТЗЫВ

официального оппонента Потлова Антона Юрьевича на диссертационную работу Зыкова Алексея Андреевича «Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика»

Актуальность темы исследования

Важность вычислительных (численных, компьютерных) экспериментов для современной науки и практики возрастает с каждым годом. Отчасти такое положение дел связано с бурным прогрессом в полупроводниковой промышленности, электронике и информационных технологиях, но первопричина все же в возможности имитировать сложные ситуации, события, явления и процессы в тщательно контролируемых условиях, обеспечение которых в реальных (физических, натуральных) экспериментах может быть очень сложным или даже невозможным. Факторы экономии средств и времени, необходимых на проведение серий натуральных экспериментов, тоже весьма важны.

Диссертационная работа Зыкова Алексея Андреевича посвящена очень важной тематике создания новых и совершенствования известных медицинских диагностических систем с высокой степенью визуализации. Исследование проведено на стыке классической оптической когерентной томографии, позволяющей получать структурные изображения сканируемых биологических тканей с микронным пространственным разрешением и добавочных ее модальностей для функциональной визуализации. Из совокупности методов, расширяющих диагностические возможности оптической когерентной томографии (ОКТ) на получение картограмм поляризационных свойств, местоположения, направлений и скоростей потоков биологических жидкостей, деформаций и упругих свойств, соискателем сделан акцент на ангиографической и эластографической визуализации на основе анализа фазочувствительных ОКТ-данных. В частности, целью диссертационного исследования заявлено повышение качества этих типов визуализации.

Для развития вышеуказанных методов функциональной визуализации при оптической когерентной томографии диссертант разработал и верифицировал достоверный, но при этом вычислительно эффективный метод математического моделирования совокупности физических процессов, происходящих при сканировании биологической ткани передовой радиофизической измерительной системой: оптическим волоконным интерферометром со спектральным принципом формирования А-сканов по глубине и латеральным сканированием для получения изображений оптической когерентной томографии. Обобщив результаты серии вычислительных экспериментов, Зыков А.А. выявил значимые физико-математические закономерности, сформировал на их основе новые методы и алгоритмы для улучшения качества ангиографической и эластографической визуализации на основе оптической когерентной томографии. Затем практически реализовал и доказал эффективность всех предложенных научно-практических решений.

Таким образом, тема диссертационного исследования актуальна, а его цель и основное содержание соответствуют паспорту специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Основные научные и практические результаты, значимость и новизна

Ключевым научным результатом диссертационного исследования является модель формирования интерференционных сигналов оптической когерентной томографии,

базирующаяся на волновом подходе к описанию поведения зондирующего излучения в биологических тканях, широко принятой модели рассеивающей среды как совокупности дискретных рассеивателей и баллистическом характере обратного рассеяния фотонов, который является ключевым для принципа формирования ОКТ-изображений. Модель также использует приближение слабофокусированного освещающего пучка, что является типичным для подавляющего большинства ОКТ приборов и позволяет аппроксимировать поперечное распределение амплитуды зондирующего пучка независимым от глубины гауссовым профилем, пренебрегая кривизной фазового фронта в поперечном сечении. Формирование функций рассеяния точки в осевом направлении производится посредством численно выполняемого Фурье-преобразования спектральных гармоник зондирующего пучка. При этом опционально можно вводить зависимость амплитуды сигнала от глубины, имитируя потери на рассеяние и поглощение, а также моделировать шум на приемной линейке посредством добавления случайных комплексных значений к получаемым в модели комплексным амплитудам пикселей.

Вышеуказанная модель имеет высокую теоретическую значимость по причине хорошего соответствия физике формирования фазочувствительных ОКТ-сканов на основе регистрирования амплитуд спектральных составляющих широкополосных сигналов каждым отдельным фотоприемником приемной линейки. С практической точки зрения, предложенная модель важна тем, что позволяет вычислительно эффективно и, что самое важное, с высоким уровнем достоверности имитировать результаты сканирования биологических тканей и их фантомов с очень сложным геометрическим и оптическим строением. Также этот подход позволяет имитировать ОКТ сканы при наличии произвольных движений рассеивателей между сканами, что принципиально важно для моделирования деформаций среды, наличия в ней потоков и иных регулярных или случайных движений рассеивателей.

Проведенные автором серии компьютерных экспериментов с детальным анализом полученных результатов позволили получить другой важный научный результат: для улучшения качества ангиографической визуализации предложить метод эффективной компенсации декорреляционных искажений, вызываемых маскирующими движениями среды (сердцебиение, дыхание, физиологический тремор и т.п.). Этот метод базируется на комбинированной амплитудно-фазовой компенсации и экспериментально установленном, а также аналитически подтвержденном факте гораздо большей чувствительности фазы интерференционного сигнала к аксиальным смещениям, чем к латеральным, и отличаются тем, что последовательно производятся начальная оценка сглаженной разности фаз, вычисляется ассоциированный с деформацией аксиальный сдвиг, выполняется Фурье-сдвиг каждого отдельного А-скана, вычисляется векторно усредненная разность фаз и производится фазовая компенсация с использованием усреднения по скользящему окну.

С теоретической точки зрения, метод эффективной компенсации декорреляционных искажений, вызываемых маскирующими движениями среды важен тем, что устанавливает однозначную связь между масштабом деформации и изменениями в интерференционном сигнале: маскирующие движения биологической ткани соотносятся с небольшими изменениями фазы между В-сканами, при которых изменениями в распределении амплитуды в первом приближении можно пренебречь. Однако встречающиеся на практике более сильные деформации не могут быть описаны только изменениями в фазе интерференционного сигнала и требуют амплитудно-фазового подхода. С практической точки зрения, предложенный метод существенно повышает качество двумерных послойных и

трехмерных объемных изображений кровеносных сосудов при реализации ангиографии на основе оптической когерентной томографии.

Важно отметить, что соискателем дополнительно предложен важный для науки и практики новый вариант реализации ОКТ-ангиографии, основанный на непрерывности механически вызванных деформаций в ткани и локальном нарушении этой непрерывности в области пространства, соответствующей поперечному сечению кровеносного сосуда.

Еще одним важным результатом вычислительных экспериментов соискателя является набор методов для адаптивного выбора основных параметров обработки совокупностей интерференционных сигналов оптической когерентной томографии для повышения качества ОКТ-визуализации деформаций неоднородных в пространстве и переменных во времени. Эти методы базируются на учете этой пространственно-временной неоднородности при выборе параметров обработки сигнала для оценивания градиента межкадровых вариаций фазы и размеров окна предварительного усреднения. Предложенный в диссертации метод адаптивного выбора масштаба оценки фазового градиента отличается тем, что формируется специальная пространственно-зависимая маска шага дифференцирования, при этом для поиска оптимального значения шага дифференцирования для совокупности не перекрывающихся участков производится постепенное его увеличение с последующим расчетом и запоминанием усредненного фазового градиента до возникновения ситуации смены знака градиента. Соответствующий этому уровень шага дифференцирования (еще не приводящий к нарушению однозначности фазы) считается оптимальным. Авторский метод адаптивного выбора размеров окна для векторного усреднения, отличается тем, что производится расчет вертикальных и горизонтальных фазовых градиентов и связанных с ними значений шага дифференцирования, предварительный размер окна для векторного усреднения оценивается как округленная в меньшую сторону $\frac{1}{2}$ от шага дифференцирования, выполняется предварительное усреднение, а также итерационно уточняются шаги дифференцирования и фазовый градиент. По завершению итерационного процесса производится финальное векторное усреднение. Соискателем также найдена и аналитически доказана взаимосвязь между оптимальным размером области усреднения и масштабом дифференцирования, сформулированная им следующим образом: масштаб области усреднения для фазочувствительных В-сканов оптической когерентной томографии, как правило, в 2 раза меньше масштаба оценки градиента межкадровых вариаций фазы. На основе этой взаимосвязи предложена упрощенная версия метода адаптивного выбора размеров окна для векторного усреднения без защиты от выхода за пределы области однозначности фазы.

С теоретической точки зрения, методы адаптивного выбора основных параметров обработки совокупностей интерференционных сигналов оптической когерентной томографии важны тем, что численный подбор градиента межкадровых вариаций фазы и размеров окна для векторного усреднения базируются на аналитических оценках величины отношения сигнал/шум. Эти оценки выявлены соискателем в результате многостороннего анализа результатов вычислительных экспериментов. Хорошее совпадение теории и результатов экспериментов дополнительно подтверждает исключительно высокий уровень диссертационной работы Зыкова Алексея Андреевича. С практической точки зрения, адаптивный подбор градиента межкадровых вариаций фазы и размеров окна для векторного усреднения повышает качество картограмм деформаций и упругих свойств исследуемой биологической ткани при эластографии на основе оптической когерентной томографии.

Ключевые авторские научные решения ориентированы на использование в реальной клинической практике, что подтверждается приведенными в диссертационном исследовании многочисленными результатами применения разработанных методов для реальных медико-биологических сигналов и данных. Отдельные научные решения пригодны для использования при производстве, тестировании и введении в эксплуатацию медицинских диагностических систем на основе оптической когерентной томографии.

В целом, результаты диссертационного исследования будут полезны широкому кругу специалистов, занимающихся научными исследованиями и разработками в области радиофизики, биофизики, биомедицинской инженерии, волоконно-оптического приборостроения.

Степень обоснованности научных положений, достоверность выводов и рекомендаций, личный вклад

Теоретическая база диссертационного исследования лаконично изложена (1 глава) и полностью адекватна цели и задачам исследования. Для формирования численной модели использовались, являющиеся каноническими для предметной области, приближение однократного рассеяния и представление рассеивающей среды в виде набора локализованных дискретных рассеивателей. Предложенные методы и алгоритмы основываются на известных для радиофизики подходах и базируются на современных представлениях о цифровой обработке многомерных сигналов и данных, в том числе в биомедицине. Численное моделирование выполнено в среде MATLAB на высоком профессиональном уровне. Верификация и валидация авторской численной модели осуществлены с использованием результатов контрольных физических экспериментов самыми передовыми методами. Переход от математического моделирования к учету, полученных в результате совокупности вычислительных экспериментов зависимостей, с целью повышения качества визуализации кровеносных сосудов (2 глава) и оценки деформаций (3 глава) на основе оптической когерентной томографии выполнен грамотно и не противоречит результатам, известным из репрезентативных источников научной информации. Представленные аналитические зависимости подтверждаются результатами численных экспериментов, а предложенные методы и подходы вычислительно эффективны и ориентированы на практическое применение.

В целом, достоверность результатов диссертационного исследования с точки зрения физики, математики, теории обработки сильно зашумленных сигналов и данных, высокоточного приборостроения, информационных технологий, биомедицины и даже медицинской эргономики сомнений не вызывают. Основные положения, выносимые на защиту, грамотно сформулированы и тщательно обоснованы.

Личный существенный или определяющий вклад соискателя в представленные в диссертации научные и научно-практические результаты, выводы и рекомендации сомнений не вызывает. Уровень опубликования и апробации результатов диссертационного исследования существенно превышает средний по области наук. В частности, основные положения диссертационного исследования опубликованы в 7 научных статьях в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах, таких как: «Laser Physics Letters», «Photonics», «Journal of Biomedical Photonics & Engineering». Соискатель является соавтором главы «Компрессионная оптическая когерентная эластография. Количественная оценка параметров жесткости: распределение значений жесткости и нелинейности» в книге «Мультимодальная оптическая когерентная томография в клинической медицине»,

опубликованной авторитетным издательством «Физматлит» и докладчиком на 16 тематических Отечественных и зарубежных научных и научно-практических конференциях.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа производит однозначно положительное впечатление. Текст диссертации лаконичен, на 116 страницах работы последовательно изложены теоретические основы предлагаемых решений, вычислительно эффективный метод моделирования интерференционных сигналов оптической когерентной томографии, его верификация и валидация, результаты оценки серии компьютерных экспериментов, базирующиеся на их основе высокоточные методы получения ангиограмм и эластограмм, их практическая реализация и тестирование на реальных клинических данных. Список литературы содержит 124 грамотно подобранных ссылки. Автореферат точно и в понятной форме передает суть диссертационной работы.

Последовательность изложения материала диссертационной работы обеспечивает удобство его восприятия и единство внутренней структуры работы. Терминология корректна, опечатки и стилистические погрешности практически отсутствуют. Необходимые справочные данные представлены. Перекрестные ссылки между пунктами диссертации упрощают понимание материала. Диссертация наглядно проиллюстрирована, в работе содержится 52 тщательно подготовленных рисунка.

Явные недостатки при ознакомлении с работой не обнаружены, существенных замечаний по сути полученных в диссертации научных и практических результатов не возникло. Методологически верно уточнить лишь несколько аспектов:

1. Предложенная модель формирования интерференционных сигналов оптической когерентной томографии основана на приближении однократного рассеяния и непосредственно не учитывает деградацию сигнала по глубине. Можно ли адаптировать авторскую модель для учета большего количества оптических явлений, артефактов и шумов? Как сильно это отразится на вычислительной эффективности компьютерных экспериментов?

2. Каковы оценочные затраты машинного времени на авторскую адаптивную высококачественную ангиографическую и эластографическую визуализацию на основе оптической когерентной эластографии на среднестатистическом рабочем компьютере практикующего врача? Как соотносятся оценочные вычислительные затраты с режимом реального времени, есть ли смысл в дополнительном использовании параллельных вычислений?

3. Какие параметры обработки многомерных сигналов и данных при эластографической и ангиографической визуализации на основе оптической когерентной томографии, помимо использованных автором, потенциально имеет смысл выбирать адаптивно?

Вышеуказанные замечания носят уточняющий/рекомендательный характер и не снижают общей исключительно положительной оценки диссертационной работы Зыкова Алексея Андреевича.

Заключение

Название диссертации и ее содержание, в том числе автореферат, соответствуют 2, 4 и 5 пунктам паспорта научной специальности 1.3.4 «Радиофизика». Все представленные соискателем научные результаты верны и корректно обоснованы, а также имеют существенное теоретическое и практическое значение.

В диссертационной работе Зыкова А.А. решена актуальная научная задача развития методов неинвазивной и малоинвазивной медицинской диагностики с использованием

ангиографической и эластографической модальностей на основе оптической когерентной эластографии. Для ее решения соискатель разработал научные основы и методы проведения тематических радиофизических вычислительных экспериментов, изучил и смоделировал процессы формирования сканов биологических тканей методами низкокогерентной интерферометрии в методе фазочувствительной оптической когерентной томографии, методологически и программно адаптивно оптимизировал величину отношения сигнал/шум в ангиографической и эластографической модальностях вышеуказанного метода.

Диссертационная работа Зыкова Алексея Андреевича «Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов» представляет собой законченное самостоятельное научное исследование. Все поставленные задачи были успешно решены, а цель работы – достигнута. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно пп. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013г., а ее автор Зыков Алексей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Официальный оппонент: кандидат технических наук по специальности 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», с 26.09.2025г. – доктор технических наук по специальности 2.2.12 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», ученое звание доцент, доцент кафедры «Биомедицинская техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)


(подпись)

/ Потлов Антон Юрьевич /
(расшифровка подписи)

Я, Потлов Антон Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

20.10.2025г.

Почтовый адрес: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Контактный телефон: (4752) 63-56-20.

E-mail: zerner@yandex.ru



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ТГТУ


Г.В. Мозгова
20.10.2025 г.