

## О Т З Ы В

официального оппонента В.П. Захарова на диссертационную работу Терпелова Дмитрия Александровича «Системы управления и обработки сигналов в корреляционной и спектральной оптической когерентной томографии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Развитие высокоразрешающих приборов 2D и 3D визуализации во многом определяется созданием эффективных методов обработки оптических сигналов, способных проводить надежное выделение кросскорреляционных компонент в реальном режиме времени. Это особенно важно для биомедицинских применений оптического когерентного томографа (ОКТ), когда требуется обеспечить диагностику на клеточном уровне. Для эффективного использования оптической когерентной томографии в медицине требуется развитие спектральных ОКТ, обладающих существенно большей скоростью и позволяющих обеспечить визуализацию физиологических и функциональных параметров живой ткани, восстановление трехмерной топологии строения ткани. Последнее достигается за счет применения высокоскоростных матриц высокой разрядности в ИК-диапазоне спектра. При этом неизменно возрастает объем обрабатываемой информации и для обеспечения работы в реальном режиме времени необходимо применять системный анализ при проектировании всего комплекса, учитывая динамические характеристики исполнительных механизмов, частотные характеристики модуляторов, пропускную способность и тип систем сбора и ввода данных в компьютер. Немаловажную роль играет математическая сложность алгоритмов обработки данных, в частности, эффективность методов выделения и компенсации автокорреляционных компонент и когерентных шумов. Комплексное исследование указанных вопросов для повышения быстродействия системы

несомненно является актуальной проблемой, решению которой и посвящена диссертационная работа Д.А. Терпелова.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованных источников из 123 наименований, изложена на 128 страницах, содержит 44 рисунка. По теме диссертации опубликовано 38 научных работ, в числе которых 13 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК.

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы, показана научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе автором проведен обзор литературных данных по методам когерентной оптической томографии, способам и особенностям их физической реализации. Проанализированы методы выделения кросскорреляционной компоненты интерференционного сигнала. Особое внимание обращено на особенности реализации интерфейсных систем для корреляционных и спектральных методов оптической когерентной томографии, что позволило Д.А. Терпелову убедительно обосновать задачи и методы собственного исследования.

Второй главе автор сосредоточился на обосновании практической реализации систем и узлов корреляционной ОКТ, описана разработанная система модуляции оптического пути на основе дискового пьезоволоконного модулятора. Детальное исследование характеристик модулятора позволило Д.А. Терпелову предложить методы синтеза закона управления и цифровой обработки сигнала, обеспечивающие высокую скорость сканирования, стабильные характеристики ОКТ, необходимый динамический диапазон и глубину визуализации в условиях ограниченной разрядности обрабатываемых данных.

В последующих главах автором представлены детальные исследования методов повышения пространственного разрешения, линеаризации спектральных отсчетов и подавления когерентных помех в спектральных ОКТ для эффективного выделения кросскорреляционной компоненты интерференционного сигнала. Автором показано, что устранение когерентных помех автокорреляционной природы в условиях большого уровня автокорреляционной составляющей наиболее эффективно на основе фазовых методов. Хотелось бы обратить внимание на предложенные Д.А. Терпеловым методы компенсации когерентных помех, основанные на модуляции взаимной задержки сигнальной и опорной волн, создающие фазовые сдвиги по определенному закону в последовательных А-сканах, и выделения когерентных помех в течении одной экспозиции, а также пространственной модуляции двумерного интерференционного сигнала при внесении несущей частоты в интерференционный сигнал при латеральном движении зондирующего луча. В первом случае достигается минимальная цифровая обработка, а во-втором устраняется автокорреляционная составляющая сигнала в процессе прямого спектрального выделения кросскорреляционной компоненты спектра на сдвинутой частоте. Это позволяет достаточно эффективно компенсировать когерентные артефакты в формируемых изображениях, в том числе и во время сканирования.

Несомненным достижением автора диссертации является предложенный метод восстановления изображений без априорной информации о свойствах передаточных каналов на основе моделей, параметры которых оцениваются по принятым сигналам. Это позволяет устранять на изображениях артефакты повторных сигналов, связанные с различиями в частотных характеристиках приемных каналов и разными задержками при распространении и дискретизации сигналов.

Д.А. Терпелову удалось за счет оптимизации архитектуры электронных интерфейсных систем и связей между электронными системами осуществить

непрерывное считывание спектральных данных с линейной матрицы фотопроекторов и непрерывную передачу цифровых данных в компьютер со средней скоростью до 20 МБ/сек для интерфейса на основе USB2.0 и 188 МБ/сек для интерфейса на основе USB3.0. Это позволило обеспечить формирование изображений со скоростью 91912 А – сканов/сек, что является принципиальным фактором для трехмерной визуализации в медицинских применениях.

В целом можно констатировать, что к наиболее значимым результатам диссертационной работы Д.А. Терпелова, определяющей ее **новизну и научную значимость**, относятся развитие методов синтеза управляющего сигнала для пьезоволоконного модулятора оптического пути интерферометра в условиях нелинейностей и механических резонансов, обеспечивающих помехо-защищенное функционирование волоконных ОКТ-систем в реальном времени; оригинальные алгоритмы и методы подавления автокорреляционных и когерентных помех, паразитной амплитудной модуляции, устраняющие макродвижения и когерентные артефакты изображения и обеспечивающие высокую скорость работы ОКТ.

Особое внимание хотелось бы обратить на подробность и всесторонность проведенного анализа методов оптической когерентной томографии, комплексность анализа систем и их взаимовлияния, детальность их исследований, включая скрупулезные экспериментальные обоснования каждого факта и свойства предлагаемых методов физической реализации и цифровых вычислительных процедур коррекции изображения. Это позволяет сделать однозначный вывод о **достоверности** полученных результатов исследований. Каждое научное положение и выводы диссертационной работы Д.А. Терпелова подкрепляются обширными экспериментальными исследованиями. Это позволяет сделать вывод о высокой степени **обоснованности** выносимых на защиту научных положений. Несомненным достижением является широкое внедрение в медицинские учреждения

разработанных ОКТ. Это говорит о высочайшей **практической** значимости работы автора.

Тем не менее, диссертационная работа Д.А. Терпелова содержит ряд недостатков:

1. При обосновании метода восстановления огибающей интерференционного сигнала при различных уровнях шумов автор на стр.48 ссылается на проведенные вычислительные эксперименты в среде Matlab, однако, подробно данные эксперименты в диссертационной работе не описаны.
2. В главе 2 утверждается, что использование одинаковых пьезомодуляторов в двух плечах интерферометра уменьшает влияние случайных изменений степени поляризации в волоконных трактах и температурные дрейфы оптического пути. Однако, известно, что параметры дисковых пьезомодуляторов являются принципиально индивидуальными. Другое дело, что за счет специализированной коррекции управляющих сигналов можно стабилизировать параметры модуляторов. Тем не менее из этого далеко не следует коррекция случайной поляризации, а температурный дрейф в большей степени зависит от мощности сигналов управления модуляторами нежели от схемы их включения.
3. В главе 3 анализируется линейная продольная фазовая модуляция кратная частоте экспозиции. Однако, все эксперименты проводились с неподвижными тестовыми объектами. В связи с этим не понятно насколько чувствителен данный метод модуляции к движениям объекта, включая разные скорости и частоты колебания его разных внутренних частей, что характерно для медицинских применений.
4. В главе 4 автором детально анализируются шумы разработанных спектральных ОКТ, при этом темновые шумы и шумы квантования априори опускаются по сравнению с дробовыми шумами. Более логичным было бы привести их оценку.

5. В оформлении диссертационной работы имеется ряд незначительных упущений:

- a Опечатки в номерах рисунков на стр.30, 35, 85
- b использование повторяющихся рисунков и формул (например, рис. 6 на стр.37 и рис.13 на стр. 45; формула (12) на стр.57 и формула (29) на стр.97);
- c неправильная ссылка на формулу (25) на стр.97;
- d на рис. 17 не приведена расшифровка позиций.

Характеризуя диссертацию Д.А. Терпелова следует отметить, что она имеет четкую структуру, написана понятным литературным языком, хорошо оформлена. Основные положения, результаты и выводы сформулированы корректно и правильно отражают оригинальные результаты, полученные в исследованиях Д.А. Терпелова.

Опубликованные по теме научные работы Д.А. Терпелова широко известны исследователям, специализирующимся в области биомедицинской оптики.

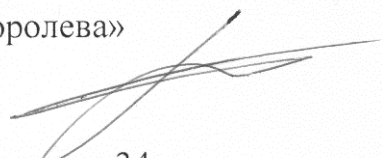
По совокупности полученных результатов и выводов диссертационная работа является законченным научным исследованием, в котором решена важная задача повышения эффективности и скорости сканирования спектральных ОКТ за счет оптимизации интерфейсных систем и методов выделения кросскорреляционной компоненты сигнала. Автореферат с достаточной полнотой отражает ее содержание.

Оценивая диссертационную работу Д.А. Терпелова в целом, можно сделать вывод, что она отвечает всем требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

15 ноября 2018 года

Заведующий кафедрой лазерных и биотехнических систем  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»  
д.ф.-м.н., профессор



В.П. Захаров

443086 Россия, г. Самара, Московское шоссе 34  
Тел. 8-(846)-267-4550  
E-Mail: [zakharov@ssau.ru](mailto:zakharov@ssau.ru)

Подпись профессора Захарова В.П. подтверждаю

Ученый секретарь Самарского  
университета  
В.С. Кузьмичев

