

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Геликонова Григория Валентиновича «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является одним из основных оптических инструментов экспериментальной и прикладной радиофизики при неинвазивном исследовании внутренних структур биологических тканей, использующим методы низкокогерентной интерферометрии ближнего ИК-диапазона. Достижения в области ОКТ базируются не только на реализации предельных возможностей существующих методов, но и на разработке новых методов визуализации, которые повышают информативность физических, и медико-биологических исследований. Докторская диссертация Г.В. Геликонова, которая посвящена развитию методов ОКТ на основе волоконной оптики и сверхширокополосного излучения ИК-диапазона, демонстрирует развитие современных физических подходов в области ОКТ и реализацию реальных прикладных систем, к созданию которых автор приступил, начиная, практически, с первых публикация по ОКТ тематике в мире.

**Актуальность** рассмотренных в диссертации задач не вызывает сомнений и подтверждается постоянным потоком публикаций по физическим вопросам по затронутым в диссертации темам.

**Структура диссертация** включает введение, шесть глав, заключение, и список литературы.

Во введении обоснована актуальность, обозначены цели и задачи исследований, сформулированы защищаемые положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненной работы, степень достоверности и апробация результатов, основное содержание работы.

**В первой главе** приведен обзор литературы по оптической когерентной томографии.

**Во второй главе** описываются созданные базовые схемы волоконно-оптических интерферометрических ОКТ систем на основе корреляционного и спектрального методов детектирования обратно рассеянного объектом излучения, развитие которых излагается в последующих разделах диссертации. Как следует из анализа материала второй главы, разработка волоконно-оптической линии задержки позволило впервые реализовать корреляционный принцип приема сигнала на частоте доплеровского сдвига в полностью волоконной системе, что послужило базой для ряда дальнейших разработок. В их число входят системы на основе поляризационно-удерживающего волокна со стабильной линейной поляризацией

на выходе гибкого зонда, позволившие впервые в мире провести эндоскопические ОКТ исследования в клинических условиях. Продемонстрировано, что в таких системах выбор рабочих поляризационных мод позволяет устранить проявления в информационной части ОКТ изображений помех, присущих ОКТ системам с поляризационно-удерживающим волокном. На основе использования волноводных свойств поляризационных мод поляризационно-удерживающего волокна реализован метод одновременного ко-и кроссполяризационного приема в корреляционной ОКТ. К числу уникальных относится и реализация одновременного зондирования объекта на волнах 830 нм и 1280 нм с единым интерферометром, позволяющая получать совмещенные ОКТ изображения обратного рассеяния. Приводится краткое описание уникального микрозонда с вперед смотрящей зоной поперечного сканирования. Описана обнаруженная специфическая для ОКТ абберация оптической системы зонда, обусловленная непостоянством длины оптического пути, и метод ее устранения. Рассмотрен принципиально новый подход к корреляционным и спектральным ОКТ системам, позволяющий использовать изотропное волокно в гибком зонде за счет применения тандемных схем, состоящих из измерительного интерферометра Физо с общим оптическим путем для сигнальной и опорной волн и компенсирующего интерферометра Майкельсона. Показаны преимущества таких систем, заключающиеся в возможности обеспечения повторяемости результатов при использовании сменных зондов, а также возможности удвоения, относительно схемы на интерферометре Майкельсона, мощности зондирующей волны без нарушения стандартов безопасности. Описана реализация волоконно-полупроводникового лазера с возможностью быстрой перестройкой частоты генерации на единицы процентов для спектрального ОКТ, в котором спектральная селекция обеспечивается за счет инвертированных отражательных резонансов, полученных при наклоне микроинтерферометра Фабри-Перо и волоконной фильтрации его возбужденной моды.

**Третья глава** диссертации посвящена решению проблемы улучшения пространственного разрешения и снижения влияния дисперсии оптической схемы ОКТ и исследуемой среды, проявляющейся при использовании широкополосного излучения при зондировании. Описан оптический когерентный микроскоп (ОКМ) с корреляционным приемом, в котором реализован принцип совмещения зондирования широкополосным излучением и конфокальной микроскопии при реализации «динамического фокуса», действие которого заключается в следовании области острой фокусировки за областью когерентного приема в процессе А-скана. Описана методика эффективного подавления боковых полос аппаратной функции, обусловленных сложной формой спектра суммарного излучения двух суперлюминесцентных источников на основе цифровой коррекции спектра сигнала в области доплеровских частот. Описаны методы численной коррекции дисперсионных искажений на основе коррекции комплексного спектра зарегистрированного ОКТ сигнала, разработанные для достижения предельно возможного разрешения. Рассмотрены предложенные автором методы измерения дисперсионных искажений непосредственно по сигналу, эффективные как в

корреляционной, так и в спектральной ОКТ, при условии незначительного влияния дисперсии в зондируемом участке биоткани. Проведено сравнение эффективности метода коррекции влияния дисперсии, основанного на прямом измерении фазы корректирующей функции при зондировании резкой границы и метода на основе определения спектральной зависимости задержки отдельных спектральных компонентов при помощи преобразования Габора, пригодного для объектов сложной формы. Экспериментальная апробация методов проведена при корреляционном приеме сигнала при относительной ширине спектра около 16%, полученной при добавлении дополнительно СЛД к источнику базового ОКМ, и при ширине спектра 23% в системе со спектральным приемом. В рассмотренных примерах с зондированием зеркальной границы и биологических объектов с диспергирующей средой на трассе зондирующей волны показано, что предложенные методы, в сочетании с подавлением боковых полос, сокращают ширину аппаратной функции в десятки раз, практически до спектрально обусловленного значения. Показано, согласно контрольным вычислениям Шенноновской энтропии изображений, что метод коррекции изображений на основе преобразования Габора, даже при ширине спектра 23%, продемонстрировал лучший результат. Апробирована эффективность волоконного метода компенсации несбалансированной дисперсии в плечах интерферометра на анизотропном волокне одновременно на длинах волн 830 нм и 1280 нм, что эквивалентно крайним границам спектра с относительной шириной около 50%. Показано, что приближение к спектрально обусловленным значениям разрешения при такой ширине спектра, по-видимому, возможно только при дополнительной коррекции сигнала цифровыми методами.

**Четвертая глава** посвящена линеаризации спектральных отсчетов в спектральной ОКТ со спектрометром на дифракционной решетке. В отличие от стандартных методов линеаризации, использующих цифровую передискретизацию, в диссертации разработан метод компенсации неэквидистантности при помощи специализированной оптической призмы. Сформулированы критерии оценки эффективности компенсации с введением метрики, дающей численную оценку остаточной неэквидистантности. Показана неоднозначность локального минимума метрики, как функции угла призмы и угла ее разворота. Показано существование абсолютного минимума, и возможность определения области допустимых настроек при заданных ширинах спектров и заданном численно критерии оценки эффективности компенсации. Предложен метод компенсации при помощи системы из двух стандартных призм, которая обеспечивает более гибкую настройку при более широких спектрах. Показано, что предложенные оптические методы позволяют получать близкую к спектрально обусловленному значению аппаратную функцию на всех доступных глубинах зондирования при двукратном снижении вычислительной емкости.

**Пятая глава** посвящена разработке высокоэффективных методов подавления зеркальных изображений и артефактов, обусловленных когерентными помехами, в

спектральной ОКТ, в которой реализуется прием модуля спектральных компонентов сигнала интерференции. Приведена классификация артефактов и сформулированы условия оптимального выделения полезного сигнала, зависящего от разности фаз. Разработан фазовый метод удаления влияния поперечного движения при сканировании при сравнении соседних А-сканов, основанный на Фурье-преобразовании по поперечной координате с коррекцией фаз спектральных компонентов. Приводятся результаты разработки и апробации метода получения комплексного сигнала спектрального ОКТ на основе ахроматического фазового элемента, ахроматизм которого достигается изменением эффективного показателя преломления оптических пластинок при наклоне.

**Шестая глава** посвящена разработке оригинальных многофункциональных ОКТ на основе кросс-поляризационных измерений, методов локального анализа ОКТ изображений с использованием корреляционных методик и динамики спеклов. Для поляризационных задач разработан ряд методов кроссполяризационных измерений на поляризационно-удерживающем и изотропном волокнах. В том числе описаны принципы и практическая разработка тандемной ОКТ системы на изотропном волокне с решением проблемы дистанционного поддержания кругового состояния поляризации зондирующей волны в гибком зонде. Описывается разработка ангиографических ОКТ методов для визуализации микроциркуляции в реальном времени и исследования упругих свойств биоткани. Методы основаны на дифференциальной обработке локальных участков изображений для ряда методов сканирования при использовании разработанных эффективных методов снижения влияния паразитных фазовых возмущений сигнала, вызванных движениями живого объекта.

Таким образом, в диссертации разработан ряд важных радиофизических методов оптической когерентной томографии, многие из которых имеют более широкую область приложений в низкокогерентной оптике и волоконной интерферометрии. В диссертации достаточно полно отражается место и задачи проведенных исследований в ряду предшествующих работ и работ, проводившихся в мире во время выполнения диссертации. Результатом рассмотрения в диссертации новых подходов и методов, их физического обоснования и экспериментальной проверки, являются сформулированные оригинальные положения.

Вместе с тем, диссертация не свободна от некоторых недостатков. К недостаткам следует отнести излишнюю краткость при описании ряда оригинальных волоконно-оптических систем и методов для получения ОКТ изображений, систем, разработанных автором впервые, которые автор использовал как базовые при дальнейших разработках. Следовало бы большее внимание посвятить обсуждению с физической точки зрения некоторых разработанных в диссертации методов получения ОКТ изображений, основанных на выделении

различных оптических, механических и физиологических эффектов в биоткани, что представляет важное методическое значение на практике.

В диссертации можно отметить ряд опечаток и погрешностей оформления, которые, тем не менее, не снижают общее положительное впечатление от формы представления результатов и оформления диссертации.

Отмеченные недостатки не уменьшают значимости результатов диссертации в целом. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных отечественных и зарубежных журналах, многократно докладывались на международных конференциях и хорошо известны научной общественности. Оригинальность работ подтверждается многочисленными патентами автора.

Работа Г.В. Геликонова свидетельствует о его высокой научной квалификации, а совокупность полученных им результатов можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное социально-экономическое и хозяйственное значение. В работе также изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Автореферат и публикации автора правильно и полно отражают содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Геликонова Григория Валентиновича «Развитие методов оптической когерентной томографии» соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 28.08.2017) "О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Официальный оппонент  
заведующий кафедрой оптики и биофотоники  
ФГБОУ ВО "Саратовский национальный  
исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского",  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заслуженный деятель науки РФ

Валерий Викторович Тучин

Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83  
Телефон: +7 (8452) 21 - 07 - 22  
E-mail: tuchin@sgu.ru, tuchinvv@mail.ru

