

ОТЗЫВ

официального оппонента В.Н. Баграташвили 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.

Докторская диссертация Г.В. Геликонова посвящена развитию методов оптической когерентной томографии (ОКТ), позволяющей получать изображения поперечных подповерхностных структур биоткани с пространственным разрешением в единицы микрон. В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с развитием методов ОКТ с целью повышения пространственного разрешения в изображениях, извлечения более широкого ряда информационных параметров, создания возможности мониторинга состояния биоткани в интерактивном режиме.

Актуальность рассмотренных в диссертации задач обусловлена бурным развитием методов оптической когерентной томографии в мире и их медико-биологических приложений с целью развития средств диагностики состояния микроструктурных слоев биоткани. Разработанные в диссертации подходы достаточно универсальны и могут быть использованы для решения широкого круга вопросов.

Структура диссертация включает введение, шесть глав, заключение, и список литературы. Во введении обоснована актуальность темы исследований, обозначены цели и задачи диссертационной работы, представлены защищаемые положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненной работы, степень достоверности и апробация результатов, основное содержание работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации. В ней рассмотрены направления развития и мировые достижения в области оптической когерентной томографии.

Вторая глава посвящена описанию радиофизических методов, разработанных автором при создании волоконно-оптических интерферометрических схем и оптических элементов для решения ряда задач ОКТ при корреляционном и при спектральном способах регистрации интерференционного сигнала с использованием широкополосного (с относительной шириной спектра порядка 10%) излучения ближнего инфракрасного диапазона. Продемонстрирована реализация корреляционного метода ОКТ с обеспечением стабильного доплеровского сдвига между частотами интерферирующих волн в интерферометре Майкельсона за счет создания уникальной пьезоволоконной линии задержки. Разработан метод устранения помех в информационной части ОКТ изображений, обусловленных паразитной связью поляризационных мод в волоконных интерферометрах с поляризационно-удерживающим волокном. Кратко изложен принцип реализации поперечного сканирования зондирующим

лучом во впервые созданном эндоскопическом зонде. Обнаружена аберрация непостоянства длины оптического пути оптической системы зонда при поперечном сканировании, и показан метод ее устранения. Показана возможность реализации ко- и кроссполяризованного приема в корреляционной ОКТ системе на поляризационно-удерживающем волокне. Приводится описание корреляционной системы ОКТ с одновременным зондированием на волнах 830 нм и 1280 нм и способы реализации оптимального приема на каждой из длин волн. Изложено решение проблемы обеспечения взаимозаменяемости сменных зондов за счет использования схем ОКТ с тандемным включением измерительного интерферометра Физо и компенсирующего интерферометра Майкельсона. Показан метод реализации возможности отдельного приема ко- и кроссполяризованных компонент обратно рассеянного излучения в тандемной схеме кроссполяризованной системы ОКТ (КП ОКТ) на изотропном волокне. Рассмотрен вариант спектрального метода ОКТ, реализующий преимущества как спектрального приема, так и тандемной организации интерференции. Описан метод создания волоконно-полупроводникового лазера с перестройкой частоты генерации в единицы процентов за счет управления при помощи наклонного микроинтерферометра Фабри-Перо с экспериментально обнаруженной инвертированной отражательной резонансной характеристикой.

Третья глава посвящена созданию методов повышения пространственного разрешения в ОКТ. В разделе 3.1 рассмотрены оптические и цифровые методы повышения пространственного разрешения в оптическом когерентном микроскопе (ОКМ), при объединении излучений двух суперлюминесцентных диодов (СЛД) и использовании динамического фокуса. При реализованной ширине оптического спектра 100 нм с центральной длиной волны 900 нм получено пространственное разрешение в воздухе на уровне 4.75 мкм с приведением спектра доплеровского сигнала к гауссовой форме. Продемонстрировано преимущество ОКМ изображений над ОКТ изображениями при зондировании биологических образцов. Разработанный ОКМ использован в качестве базовой схемы при разработке методов дальнейшего повышения разрешения, описанных в последующих разделах диссертации. В разделе 3.2 описаны методы достижения предельно возможного спектрально обусловленного разрешения за счет численной коррекции комплексного спектра зарегистрированного ОКТ сигнала при искажениях, определяемых дисперсией измерительной системы и образца и формой спектра. Для корреляционной и спектральной ОКТ обоснованы методы вычисления дисперсионных искажений непосредственно по интерференционному сигналу, полученному в комплексной форме, на основе оконного преобразования Габора, и проведено сравнение их эффективности. Апробация методов проведена при зондировании ОКМ системой на тестовых объектах при относительной ширине спектра 16%, и сетчатки глаза при относительной ширине спектра в 23%. Анализ эффективности показал, что полученные значения ширины

результатирующей аппаратной функции уменьшаются в десятки раз до спектрально обусловленных значений с лучшим результатом при использовании оконного преобразования Габора. В разделе 3.3 описаны результаты пробной компенсации дисперсии интерферометра методами волоконной оптики одновременно на волнах 830 нм и 1280 нм, которые можно рассматривать как граничные длины волн спектра с шириной 450 нм. При этом отмечена необходимость дополнительной численной компенсации остаточного влияния дисперсии на ОКТ изображения.

В четвертой главе рассматриваются численные и оптические методы получения линейного по оптической частоте спектра интерференционного сигнала в спектральной ОКТ с дифракционной решеткой с возможностью их реализации при сверхширокополосном излучении. В разделе 4.2 рассмотрен оптический метод линейаризации за счет оптической призмы, а разделе 4.3 рассмотрены возможности двухпризменного компенсатора, имеющего больше регулируемых параметров, что необходимо при повышенных относительных ширинах спектров. На основе сравнительного анализа методов снижения неэквидистантности спектральных отсчетов и экспериментальной апробации показано, что предложенные оптические методы позволяют вдвое снизить нагрузку на вычислительные ресурсы ОКТ устройств.

Пятая глава посвящена методам получения комплексного сигнала, и разработке высокоэффективных методов подавления зеркальных изображений и артефактов, характерных для спектральной ОКТ, для использования при зондировании живых биологических объектов. В разделе 5.1 приводится описание структуры сигнала в спектральной ОКТ с выделением компоненты, зависящей от разности фаз между интерферирующими сигнальным и опорным лучами. Рассматриваются оригинальные методы выделения когерентных помех за одно измерение с последующим вычитанием из полного сигнала с эффективностью, как было показано в численном эксперименте, на уровне 40 дБ. В разделе 5.2 рассмотрено негативное влияние смещения луча во время сканирования на эффективность подавления когерентных помех в ОКТ сигнале и методы его устранения. Показано, что пересчет сигнала на основе Фурье преобразования по поперечной координате с последующей частотной коррекцией фазы компонент спектра пространственных частот является более эффективным методом, чем методы передискретизации и интерполяции. В разделе 5.3 описывается разработка бездисперсионного, ахроматического фазового элемента, в котором разность фаз между двумя лучами создается при пропускании через плоскопараллельные пластинки с разным наклоном, что позволяет создавать квадратурные компоненты широкополосного интерференционного сигнала при широкополосном излучении.

В шестой главе рассматриваются методы создания ОКТ систем расширенной функциональности для получения нескольких типов визуализации, дополняющих обычные

ОКТ изображения. В разделе обсуждаются особенности дополнительной информации, которую можно извлекать из сравнения изображений 2D структур обратно рассеянных биотканью излучений ко- и кроссполяризованных относительно поляризации зондирующей волны в сечении, поперечном поверхности биоткани. Обсуждается характер зависимости кроссполяризованного обратного рассеяния от состояния поляризации зондирующей волны. Описан ряд ОКТ систем с реализацией режима кроссполяризационного приема при корреляционном и спектральном способе регистрации сигнала. Показана возможность приема ко- и кроссполяризованного излучений на единой приемной системе в тандемной ОКТ системе. Показана независимость ко-изображений от состояния поляризации двух зондирующих волн с взаимно ортогональными поляризациями. Реализована поляризационная ОКТ система с отображением ориентаций структур биоткани. Показано, что локальный коэффициент кроссполяризационного рассеяния при круговой поляризации зондирующей волны больше, чем при линейной поляризации. Раздел 6.2 посвящен описанию системы активного поддержания кругового состояния зондирующей волны в тандемной ОКТ схеме за счет дополнения оптических свойств полного оптического тракта до свойств четвертьволновой фазовой пластинки с 45° ориентацией к входной линейно поляризованной волне. В разделе 6.3 описаны методы ангио ОКТ визуализации микроциркуляции в реальном времени, которые основаны на анализе спекловой изменчивости в ОКТ изображениях. Рассмотрены различные подходы к выделению и анализу изменчивости фазовых распределений соседних пространственных отсчетов сигнала при различных типах коррекции, которые устраняют фазовые искажения, обусловленные функциональными смещениями внутренних структур живого объекта и смещениями объекта в целом.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

В диссертации Г.В. Геликонова получен ряд фундаментальных и прикладных результатов. Созданы основы волоконной оптики, необходимые для реализации ряда методов оптической когерентной томографии в клинических эндоскопических приложениях. Получены оригинальные методы подавления артефактов, присущих спектральной ОКТ, а также оригинальные подходы к реализации спектрально обусловленного разрешения в методе ОКТ при сверхширокополосном зондирующем излучении с подавлением влияния суммарной дисперсии оптических трактов зондирующей системы и объекта. Разработаны эффективные методы получения поляризационных, ангиографических и эластографических ОКТ изображений.

Все предложенные автором методы физически обоснованы и экспериментально апробированы. Положения, выдвинутые в диссертации для защиты, являются результатами развития новых подходов и методов. Они обоснованы теоретическими исследованиями, их достоверность подтверждена полученными результатами экспериментов.

Можно отметить некоторые недостатки диссертационной работы. Краткое описание во второй главе базовых радиофизических методов, которые были созданы Г.В. Геликоновым при решении ряда более ранних задач ОКТ, отнесено от их более подробного описания в последующих разделах. В тексте диссертации отмечено некоторое количество опечаток, например: на стр. 36 «Корреляционный способ регистрации сигнала обладает высокой **надежность** и помехозащищенностью», на стр.79 «Большие длины **оптичекого** тракта». На стр. 39 ссылку на рисунок 4.10 следовало бы обозначить как 2.10. Отмечено использование англоязычных обозначений в подписях к осям в некоторых рисунках глав 4 и 6. Можно отметить технические погрешности, в том числе, изменение размера шрифта в обозначениях переменных, как это имеет место, например, на стр. 119.

Отмеченные недостатки никоим образом не влияют на оценку результатов диссертационной работы в целом. Основные результаты работы опубликованы в российских и зарубежных рецензируемых научных изданиях, многократно докладывались на международных конференциях, хорошо известны научной общественности. На базе разработанных и созданных Г.В. Геликоновым волоконно-оптических систем ОКТ в ряде медицинских организаций Российской Федерации развернуты пионерские работы по исследованию методов ранней диагностики патологии биоткани.

Диссертация Г.В. Геликонова свидетельствует о его высокой научной квалификации, полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор, заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,
профессор

Баграташвили Виктор Николаевич

(Институт фотонных технологий ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН,
г. Москва, г. Троицк)

Ученый секретарь,
кандидат физ-мат. наук



Просеков Павел Андреевич