



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор МГУ им. М. В. Ломоносова

профессор А.А. Федянин

ОТЗЫВ

ведущей организации 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), как метод низкокогерентной интерферометрии ближнего ИК диапазона, активно развивается в последние десятилетия. ОКТ позволяет получать изображения внутренних микроструктур биоткани с высоким пространственным разрешением за счет интерферометрического приема обратно рассеянного света. Диссертационная работа Г.В. Геликонова посвящена развитию радиофизических методов приема и обработки сигналов в оптической когерентной томографии. В диссертации развиваются корреляционные и спектральные методы ОКТ на основе волоконной оптики и сверхширокополосных источников ИК излучения. Исследования, проведенные в диссертации, являются важными и актуальными.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, в котором сформулированы основные результаты работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по решаемым в диссертации проблемам, а также обоснованию актуальности поставленных задач.

Вторая глава посвящена описанию предложенных автором новых корреляционных и спектральных методов ОКТ с применением волоконной оптики и суперлюминесцентных источников излучения, которые легли в основу последующих разработок систем ОКТ с использованием современных подходов. Описана предложенная автором оригинальная реализация корреляционной схемы ОКТ. Создание такой системы стало возможным после создания новой схемы пьезоволоконной задержки с величиной модуляции оптического пути в единицы миллиметров, с помощью которой создавался стабильный доплеровский сдвиг между частотами сигнальной и опорной волн. На основе оригинальных разработок ряда волоконно-оптических элементов на анизотропном волокне, в том числе микрозонда, автором предложена новая концепция эндоскопической ОКТ, позволившая впервые в мире начать исследования живых систем. Приводится описание системы ОКТ с одновременным зондированием на волнах 830 нм и 1280 нм, созданной на основе единого

волоконного интерферометра. Описана реализация оптического когерентного микроскопа (ОКМ), в котором были объединены принципы ОКТ и конфокальной микроскопии за счет использования динамического фокуса. Предложена новая методология создания волоконных тандемных ОКТ систем с единым трактом для зондирующей и опорной волн. Показано, что использование в таких системах дополнительного измерительного интерферометра Физо позволяет решить проблему воспроизводимости сменных волоконных зондов. В главе описаны способы реализации кросс-поляризационного приема рассеянного назад излучения в методе ОКТ в схемах как на анизотропном волокне, так и на одномодовом, поляризационно-вырожденном волокне.

Рассмотрены системы ОКТ со спектральным способом приема сигнала, в том числе и на основе предложенных автором тандемных схем. Рассмотрен оригинальный подход к созданию лазеров для спектральной ОКТ с быстрой и широкодиапазонной перестройкой частоты на единицы процентов, в котором спектральная селекция реализована с использованием инверсного отражательного резонансного отклика, возникающего при возбуждении микроинтерферометра Фабри-Перо в наклоненном положении.

Третья глава посвящена разработке и применению методов повышения пространственного разрешения в ОКТ. В частности, предложен и реализован метод получения спектрально обусловленного продольного разрешения в базовой схеме ОКМ, основанной на корреляционном принципе приема сигнала. Рассмотрены проблемы, связанные с возможностью достижения высокого поперечного разрешения при динамическом фокусе. Описываются разработанные автором методы повышения широкополосности оптических элементов схемы. Описаны методы подавления боковых полос в аппаратной функции ОКМ за счет цифровой коррекции спектра доплеровского сигнала с приведением его к гауссовой форме. Приводятся результаты модельных экспериментов с демонстрацией предельных значений разрешения, близких к спектрально обусловленному значению. В разделе 3.2 описаны предложенные автором оригинальные методы численной коррекции комплексного спектра зарегистрированного ОКТ сигнала, разработанные для достижения предельно возможного разрешения. В данном разделе описываются предложенные автором методы компенсации искажений сигнала, определяемых дисперсией и формой спектра, включая методы измерения дисперсионных искажений, основанные на прямом измерении корректирующей функции и на основе оконного преобразования Габора непосредственно по сигналу. Методы применимы как в корреляционной, так и в спектральной ОКТ. Эффективность методов продемонстрирована при экспериментах на модельном объекте, а также на живых биологических средах, включая слизистую губы при относительной ширине спектра излучения 16%, и сетчатки

глаза при относительной ширине спектра излучения в 23%. При этом достигнуто сужение аппаратной функции в десятки раз, практически до спектрально обусловленного значения. В разделе 3.3 описан метод волоконной компенсации дисперсии интерферометра на анизотропном волокне одновременно на волнах 830 нм и 1280 нм и показана его эффективность, как попытка поиска методик компенсации дисперсии при относительной ширине спектра около 50%. Показано, что дополнительную компенсацию остаточного влияния дисперсии в ОКТ изображениях на обеих длинах волн возможно, по-видимому, выполнить только при использовании современных средств приема и цифровой обработки сигнала, полученного в комплексном виде.

В четвертой главе описываются предложенные автором численные и оптические методы решения одной из ключевых проблем спектральной ОКТ – реализации линейного по оптической частоте спектра интерференционного сигнала при широкополосном излучении. В разделе 4.2. описывается решение проблемы эквидистантного по частоте отображения оптического спектра за счет дополнительной оптической призмы, а в разделе 4.3. описывается решение данной проблемы за счет двухпризменного компенсатора, дающего большую свободу настройки оптимальных параметров спектрометра для различных диапазонов и ширин спектров излучения.

Пятая глава посвящена рассмотрению методов подавления специфических для спектральной ОКТ артефактов, существенно влияющих на качество и значимость получаемых изображений. Автором обсуждаются оригинальные методы формирования свободного от помех сигнала интерференции и приведены результаты их применения. В разделе 5.1 рассматриваются особенности проявления когерентных помех в ОКТ изображении при спектральном способе приема. В разделе 5.2 рассмотрены методы устранения влияния смещения луча во время сканирования на эффективность подавления когерентных помех в ОКТ сигнале. Показано преимущество использования метода пересчета сигнала на основе Фурье преобразования по поперечной координате с частотной коррекцией фазы компонент спектра пространственных частот над методами передискретизации и интерполяции. Раздел 5.3 посвящен разработке и экспериментальной апробации бездисперсионного (ахроматического) фазового элемента для создания квадратурных компонент широкополосного интерференционного сигнала на основе различия дисперсионных характеристик плоскопараллельных пластинок с различным наклоном к оси распространения оптического излучения.

В шестой главе рассматриваются методы получения дополнительной информации средствами ОКТ для осуществления многофункционального исследования объекта. Раздел 6.1 посвящен реализации функции кроссполяризационного приема в методе ОКТ

и показана зависимость кроссполяризованного обратного рассеяния от поляризации зондирующей волны. Кроссполяризационные методы апробированы в ряде схем, в том числе тандемных, на поляризационно-удерживающих и изотропных волокнах при корреляционном и спектральном способе регистрации сигнала. Показана возможность регистрации ко- и кроссполяризованного обратно рассеянного излучения на одном приемнике без поляризационного разделения в тандемной схеме. Реализована система поворота поляризации зондирующей волны. Показана независимость ко-сигнала от состояния поляризаций зондирующих волн при зондировании одновременно двумя ортогонально поляризованными порциями излучения одинакового спектра. Реализована система поворота поляризации зондирующей волны для обнаружения ориентаций структур биоткани. Показано, что локальный коэффициент кросс-поляризационного рассеяния при круговой поляризации зондирующей волны больше или равен коэффициенту при линейной поляризации зондирующей волны, и не зависит от ориентации образца. Раздел 6.2 посвящен решению проблемы дистанционного активного поддержания кругового состояния поляризации на выходе из одномодового изотропного волокна за счет активного приведения совокупного двулучепреломления оптического волоконного тракта к эквивалентной четвертьволновой фазовой пластинке, ориентированной под 45° к входной линейной поляризации. В разделе 6.3 описаны ангио ОКТ методы визуализации микроциркуляции в реальном времени, которые основаны на анализе изменчивости фазового распределения соседних пространственных отсчетов сигнала при устранении влияния смещения объекта в целом и деформацией из-за сжатия при контактном способе зондирования.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

Таким образом, в диссертации получено и реализовано много новых фундаментальных научных результатов, что позволяет говорить о развитии нового научного направления. Значительная часть результатов имеет непосредственное практическое значение. Все ключевые идеи, предложенные автором, физически обоснованы и прошли экспериментальную проверку.

К числу фундаментальных результатов следует отнести следующие:

1. Созданы фундаментальные основы корреляционной и спектральной оптической когерентной томографии для решения задач зондирования живых биологических объектов с использованием волоконно-оптических систем ИК диапазона с реализацией спектрально обусловленного разрешения при относительной ширине спектра зондирующего фемтокоррелированного излучения в единицы - десятки процентов.

2. Предложены новые методы в спектральной оптической когерентной томографии для преодоления артефактов автокорреляционной природы в получаемых изображениях, преодоления влияния произвольной дисперсии объекта и измерительной системы и выделения на основе динамики спеклов внутренних движений микроструктур в живых объектах.

3. Разработаны радиофизические подходы к получению ко- и кросс-поляризационных картин обратного локального рассеяния, при зондировании внутренней структуры биоткани методами оптической когерентной томографии с использованием интерферометрических систем на одномодовом волокне.

4. В ходе работы был предложен ряд радиофизических методов формирования и регистрации сигналов интерференции, позволивших создать целое семейство интерферометров и основанных на их использовании установок для реализации простых компактных ОКТ установок, пригодных для применения в медицинской практике.

5. Разработаны физические и вычислительные методы измерения и компенсации параметров оптического тракта, негативно влияющих на качество регистрируемого сигнала. Среди них можно отметить метод нахождения дисперсионной искажающей функции, и метод физической линейаризации распределения оптической частоты по номеру спектральных отсчетов в оптическом широкополосном спектрометре.

Применение предложенных автором методов позволило ему радикально увеличить количество получаемой информации об объекте исследования, и открыть качественно новые диагностические возможности ОКТ, что имеет особо важное значение для народного хозяйства.

Вместе с тем, диссертация не свободна от некоторых недостатков.

На наш взгляд название диссертации является слишком общим и не вполне отражает специфику достижений автора и его основные научные результаты.

В тексте диссертации недостаточно акцентирована новизна результатов на момент их получения автором. Перечисление новых результатов лишь в отдельном разделе диссертации затрудняет оценку работы в процессе ознакомления с ней.

По нашему мнению, помимо приведения ссылок на работы других авторов, следовало бы явным образом упоминать имена наиболее известных из них.

В тексте диссертации имеются некоторые некорректные и недостаточно ясные, а также жаргонные формулировки. Так, например, на стр.138 написано: «В интерференции принимает участие только та часть рассеянного излучения, которая имеет ту же поляризацию, что и опорное». Корректнее было бы сформулировать так: «...та часть рассеянного

излучения, которая имеет не равное нулю скалярное произведение вектора волны на вектор опорной волны». На той же и на других страницах часто упоминаются не вполне удачные термины: «ко-канал», «ко-сигнал» и «ко-компоненты».

На стр. 82 написано: «...Основой восстановления сигнала является преобразование Фурье, которое каждой пространственной частоте модуляции принятого спектра ставит в соответствие точку...». Нужно было бы пояснить, почему частота является пространственной.

На стр. 156 написано: «...При этом полностью устраняется зависимость сигнала в ко-канале...». Из этой фразы не понятно о зависимости сигнала от чего идёт речь».

В тексте имеет ряд опечаток и пропусков слов.

Отмеченные недостатки существенно не снижают высокий научный уровень и не сказываются на значимости результатов диссертационной работы в целом. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах (как отечественных, так и иностранных), многократно докладывались на международных конференциях. Они хорошо известны научной общественности и прочно связаны с автором диссертации. Работа Г.В. Геликонова свидетельствует о его высокой научной квалификации, позволившей ему развить новое направление в оптической когерентной томографии, обеспечивающее её качественно новые возможности, а также существенно более высокую чувствительность, разрешающую способность и быстродействие. Автор диссертации несомненно заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация доложена на объединённом научном семинаре Международного учебно-научного лазерного центра и кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Доцент физического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова, кандидат физ.-мат. наук

А.В. Приезжев

Зав. лабораторией нелинейной оптики
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.М. Гордиенко

Зав. кафедрой физического факультета МГУ,
директор МЛЦ МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.А. Макаров