

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию

Терпелова Дмитрия Александровича

### «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

#### *1. Актуальность темы*

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. Предметом исследования диссертационной работы, на мой взгляд, является создание методов повышения эффективности систем управления, приема и обработки сигналов в корреляционных и спектральных методах оптической когерентной томографии для практической реализации методов при построении приборов ОКТ. Вопросы разработки методов улучшения характеристик приборов ОКТ остаются сложными для исследования, поскольку необходимо обеспечить быстрое действие корреляционной оптической когерентной томографии порядка 3000 А-сканов в секунду, расширить динамический диапазон измеряемого сигнала, накопить и передать большой информационный массив в реальном времени. В настоящее время сложилось известное противоречие между возможностями методов создания сверхбыстрой системы модуляции оптического пути для корреляционной ОКТ и обеспечением достаточной точности движения опорного плеча интерферометра, между требованием быстрого действия системы ОКТ и качеством изображения интерферограммы. Поэтому задача разработки новых методов улучшения характеристик приборов ОКТ для визуализации в реальном времени внутренней структуры оптически мутных сред, в том числе живых объектов является актуальной. Решение указанной проблемы позволит расширить возможности систем ОКТ для решения задач экспериментальной физики.

## *2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций*

Автор достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций.

Диссертантом изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по вопросам интерферометрии, цифровой обработки сигналов, оптической когерентной томографии, корреляционных и спектральных методов обработки принимаемых излучений. Список использованной литературы содержит 123 наименования отечественных и зарубежных научных изданий.

Для решения поставленных задач автор использует разработанную экспериментальную установку, исследования на которой обосновывают основные положения, выносимые автором на защиту.

Показано, что высокая стабильность величины доплеровского смещения оптической частоты (с отклонением не более 1%) при модуляции длины оптического пути с амплитудой в несколько тысяч длин волн пьезоволоконным модулятором может быть реализована за счёт применения управляющего сигнала специальной формы.

Предложенный автором метод формирования управляющего сигнала пьезоволоконного модулятора оптического пути в виде производной по времени с последующим аналоговым интегрированием позволяет достичь большей точности доплеровского смещения частоты опорной волны по сравнению с прямым формированием управляющего сигнала.

Теоретически и экспериментально показано, что в спектральной оптической когерентной томографии возможно устранение кросскорреляционной компоненты из интерференционного сигнала в результате модуляции длины опорного плеча интерферометра во время регистрации спектра. Это позволяет выделить не зависящую от модуляции паразитную автокорреляционную компоненту для ее последующей компенсации.

Создана архитектура электронных интерфейсных систем и связей между электронными системами, осуществляющая непрерывное считывание спектральных данных с линейной матрицы фотоприемников в спектральной ОКТ

и непрерывная передача цифровых данных в компьютер со средней скоростью до 20 МБ/с.

Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, основывается на согласованности данных теоретических расчетов, лабораторных, натурных и компьютерных экспериментов и научных выводов.

Однако преждевременно говорить о достаточной обоснованности положения, указывающего на то, что «в спектральной оптической когерентной томографии влияние паразитной амплитудной модуляции регистрируемого сигнала, обусловленной многоканальностью приемной системы оптического спектрометра, приводящее к появлению повторов на изображениях». В то же время результаты, полученные автором в исследованиях, показали, что «артефакты на изображении являются повтором структуры объекта на частоте, кратной частоте дискретизации».

### *3. Оценка новизны и достоверности*

В качестве главных научных результатов диссертантом выдвинуты положения:

1) Реализован итерационный метод синтеза управляющего сигнала для пьезоволоконного модулятора оптического пути интерферометра в условиях нелинейностей и механических резонансов, который позволил получить интерференционный сигнал в корреляционной оптической когерентной томографии на частоте доплеровского сдвига 11 МГц при скорости движения опорного плеча порядка 7.0 м/с при изменении разности хода свыше тысячи длин волн с поддержанием постоянной скорости с погрешностью менее 1 %.

2) Впервые для корреляционной оптической когерентной томографии получено быстроедействие порядка 3000 А-сканов в секунду.

3) Для спектральной оптической когерентной томографии реализован метод выделения из интерференционного сигнала автокорреляционной компоненты и когерентных помех, основанный на модуляции опорного плеча интерферометра по определенному закону в течение отдельной экспозиции спектра на выходе интерферометра.

4) Установлено, что паразитная амплитудная модуляция принятых сигналов в методе спектральной оптической когерентной томографии с параллельным приемом оптического спектра связана с различиями в частотных характеристиках приемных каналов и разными задержками распространения и дискретизации сигналов. Показано, что различия в частотных характеристиках приемных каналов приводят к артефактам на изображениях в виде повторов сигналов. Предложен метод восстановления изображений без априорной информации о свойствах передаточных каналов на основе моделей, параметры которых оцениваются из имеющихся данных.

5) С помощью созданной архитектуры электронных интерфейсных систем впервые осуществлено непрерывное считывание спектральных данных с линейных матриц фотоэлементов в спектральной оптической когерентной томографии и непрерывный поток цифровых данных со средней скоростью до 20 МБ/с с интерфейсом ввода данных в компьютер на основе USB2.0 и со скоростью до 188 МБ/с с интерфейсом ввода данных в компьютер на основе USB3.0.

6) Впервые для спектральной оптической когерентной томографии с параллельной регистрацией спектра достигнута скорость получения изображений 91912 А – сканов/сек на основе USB3.0.

Все вышеприведенные положения отличаются новизной. Я бы отметил: метод выделения из интерференционного сигнала автокорреляционной компоненты и когерентных помех; метод синтеза управляющего сигнала для пьезоволоконного модулятора оптического пути интерферометра в условиях нелинейностей и механических резонансов; создана архитектура электронных интерфейсных систем, с помощью которой впервые осуществлено непрерывное считывание спектральных данных с линейных матриц фотоэлементов в спектральной оптической когерентной томографии на основе интерфейса передачи данных USB3.0.

В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями в специальности «Приборы и методы экспериментальной физики». Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием

современных измерительных приборов, стандартных программных средств и современных методик проведения исследований.

Положения теории основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин: математика и оптика, радиотехника и электроника, методы программирования и методы радиофизических измерений. В диссертационной работе использовались методы оптических измерений и статистической обработки данных, методы микропроцессорной и компьютерной обработки сигналов. В работе диссертант грамотно использует теорию интерференции, корректно использует новые понятия: кросскорреляционная компонента, автокорреляционная компонента, когерентные помехи, шумы для интерференционных сигналов. Достоверность теоретических результатов работы подтверждается экспериментальными данными.

Основные результаты диссертации опубликованы в 38 печатных работах, в том числе 13 статей в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

Необходимо отметить практическую значимость работы. В диссертации описывается ряд методов, которые позволили реализовать схемные и алгоритмические решения, демонстрирующие высокую эффективность для обеспечения устойчивой работы ОКТ-приборов в жестких условиях практической эксплуатации.

Одним из важнейших применений данных ОКТ-систем является их использование в составе эндоскопических систем. Это предполагает комплектацию данных систем комплектом сменных эндоскопических зондов. Это обстоятельство определило использование в данных ОКТ-системах тандемной интерференционной схемы выполненной на базе анизотропного оптоволокна.

#### *4. Общие замечания по диссертационной работе*

1) В исследованиях не нашел отражение вопрос анализа собственных резонансных колебаний пьезодиска, какова температурная стабильность его

параметров, требования по калибровке и термостабилизации. А этот блок является важной частью системы ОКТ.

2) Вызывает сомнение вывод о том, что «в спектральной оптической когерентной томографии влияние паразитной амплитудной модуляции регистрируемого сигнала обусловлено многоканальностью приемной системы оптического спектрометра, приводящей к появлению повторов на изображениях». В то же время результаты, полученные автором в исследованиях, показали, что «артефакты на изображении являются повтором структуры объекта на частоте, кратной частоте дискретизации».

3) Имеется неточное изложение по «оптимизации параметров системы» (стр. 92): как проводилась оптимизация: теоретически, экспериментально, эвристически; какой результат оптимизации и т.д. И оптимизация ли это?

4) Трудно согласится с тем, что численное детектирование с последующим усреднением в пределах окна когерентности обеспечивает необходимый динамический диапазон и глубину визуализации (стр.48). Детектируется ведь уже запись сигнала, т.к. динамический диапазон уже определен свойствами среды и измерительным трактом измерительным трактом. Вернее, что численное детектирование обеспечивает точность воспроизведения сигнала за счет дискретизации, квантования и накопления при усреднении.

5) Автор не ссылается на свои работы в тексте диссертации. Это затрудняет оценку авторского и обзорного материалов.

### *Заключение*


Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение задачи, имеющей существенное значение для методов экспериментальной физики. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ» отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Терпелов Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Орлов Игорь Яковлевич  
профессор, доктор технических наук,  
профессор кафедры радиотехники  
радиофизического факультета  
Национального исследовательского  
Нижегородского государственного  
университета им. Н. И. Лобачевского



603950 г. Нижний Новгород,  
пр. Гагарина 23, [orlov@rf.unn.ru](mailto:orlov@rf.unn.ru)

