

“УТВЕРЖДАЮ”

проректор по НИР

Федерального государственного

бюджетного образовательного

учреждения высшего

образования

«Саратовский национальный исследовательский

государственный университет

имени Н.Г. Чернышевского»,

д.ф.-м.н. профессор

Короновский Алексей Александрович

2018 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

### Актуальность избранной темы

Диссертационная работа Терпелова Д.А. посвящена разработке систем управления, приема и обработки сигналов в корреляционных и спектральных методах оптической когерентной томографии для визуализации в реальном времени внутренней структуры оптически мутных сред, в том числе живых биологических тканей, а также созданию интерфейсных систем для практической реализации методов при построении приборов ОКТ.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является перспективным методом визуализации внутренней структуры оптически мутных сред с высоким пространственным разрешением (около единиц микрон) и измерения оптических параметров сред, основанным на методах низкокогерентной интерферометрии. Одной из особенностей применения методов ОКТ для диагностики тканей живых организмов является требование достижения предельной скорости получения сигналов. Как правило, исследуемые объекты являются подвижными (влияние дыхания, сердцебиения, перистальтики), что приводит к ряду ограничений в методах приема и обработки сигналов, особенно с использованием разности фаз опорной и принятых волн. Для достижения предельно возможной скорости получения изображений с высоким динамическим диапазоном в системах ОКТ должны учитываться динамические характеристики исполнительных механизмов, перемещающих оптический луч вдоль

исследуемого образца (сканирующие системы вдоль координат X и Y), частотные характеристики модуляторов фазы в плече интерферометра для получения А-сканов с определенным фазовым сдвигом, пропускная способность систем сбора и ввода данных в компьютер, математическая сложность алгоритмов обработки полученных данных. Таким образом, исследования физических и прикладных аспектов отмеченного круга проблем являются актуальными в настоящее время.

### **Новизна исследований и полученных результатов**

Для пьезоволоконного модулятора оптического пути интерферометра создан метод синтеза управляющего сигнала в условиях нелинейностей и механических резонансов, позволивший получить ОКТ-сигнал в корреляционной оптической когерентной томографии при быстроедействии порядка 3000 А-сканов в секунду.

Для спектральной оптической когерентной томографии впервые 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. 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.

Автором диссертации впервые для спектральной оптической когерентной томографии с параллельной регистрацией спектра достигнута скорость получения изображений 91912 А – сканов/сек на основе USB 3.0.

### **Значимость для науки и производства полученных результатов**

Основные выводы и результаты работы могут быть использованы для создания оптических когерентных томографов нового поколения. Созданные методы и системы управления интерферометрами, системы сбора и передачи данных рекомендуются при проведении экспериментов по визуализации внутренней структуры рассеивающих объектов с микронным разрешением, а также измерения ряда оптических параметров сред. В настоящее время разработанные методы и системы получения и обработки данных используются при создании приборов по визуализации подкожных капиллярных сосудов *in vivo* в реальном времени средствами спектральной оптической когерентной томографии. Также результаты диссертации были использованы при проведении экспериментов по применению низкокогерентной интерферометрической техники для оптического измерения напряжения в высоковольтных линиях уровня 100 кВ. Результаты главы 4 позволяют проводить эксперименты по визуализации внутренней структуры сетчатки глаза в реальном времени.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений** обеспечена теоретическим обоснованием и экспериментальным подтверждением защищаемых положений, сравнением полученных результатов с результатами научных работ других авторов.

### **Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению**

Рассматриваемые в диссертации ОКТ-системы относятся к корреляционному и спектральному типам. ОКТ-системы, рассматриваемые в данной диссертации, проектировались и реализовывались с целью их практического применения в соответствующих биомедицинских исследованиях. В диссертации развиты методы, которые позволили реализовать схемные и алгоритмические решения, максимально эффективные для обеспечения устойчивой работы ОКТ-приборов в жестких условиях практической эксплуатации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка работ автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы из 123 работ. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 44 рисунка и 7 таблиц.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлена структура и общее содержание работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** представляет собой обзор литературы для корреляционных и спектральных методов оптической когерентной томографии.

В **Главе 2** приведены результаты исследований по созданию сверхбыстрых систем модуляции оптического пути для корреляционной ОКТ и методы синтеза закона управления пьезоволоконным модулятором оптического пути.

В **Главе 3** описаны три реализованных метода выделения кросскорреляционной компоненты интерференционного сигнала с формированием комплексной формы для спектральной оптической когерентной томографии. Первый метод основан на выделении когерентных помех и автокорреляционной компоненты интерференционного сигнала в течение отдельной экспозиции спектра на выходе интерферометра с последующим их вычитанием. Во втором методе осуществляется прием интерференционного сигнала с дискретными фазовыми сдвигами. Третий метод основан на пространственной модуляции двумерного интерференционного сигнала и спектрального выделения кросскорреляционной составляющей. Также в главе показано, 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.

В **Главе 4** приведены результаты исследований по созданию для спектральной оптической когерентной томографии систем сбора и ввода данных в компьютер на основе цифровых интерфейсов USB 2.0 и USB 3.0. Также в главе 4 описаны результаты экспериментов по визуализации 2D и 3D структур с достигнутой скоростью.

Диссертация не лишена некоторых недостатков, которые вызваны, скорее, большим количеством решенных задач и необходимостью изложить результаты исследований в компактном виде:

1. Так, следовало бы более подробно описать математические процедуры обработки исходных данных в методе пространственной модуляции двумерного интерференционного сигнала.
2. Отсутствуют указания масштаба или размера структур, показанных на некоторых иллюстрациях ОКТ-изображений.
3. Надписи на рисунке 17 даны на английском языке, правильнее было бы их привести на русском языке.
4. Присутствуют опечатки в допустимом количестве.

Отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку работы, которая представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальных задач, характеризующихся новизной и практической полезностью.

#### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации, а также цель работы, ее новизну и практическую ценность, положения, выносимые на защиту.

#### **Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

По результатам работы автор диссертации (в соавторстве с коллегами) опубликовал 38 печатных работ, в числе которых 13 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК, 5 статей в материалах конференций, 20 публикаций в тезисах докладов всероссийских и международных конференций.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»**

Таким образом, диссертация Терпелова Дмитрия Александровича на тему «Системы управления и обработки сигналов в корреляционной и спектральной оптической когерентной томографии» является научно-квалификационной работой и соответствует требованиям пп. 9-11, 13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Д.А. Терпелов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв на диссертационную работу Терпелова Д.А. был заслушан и обсужден на научном семинаре кафедры оптики и биофотоники физического факультета ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» 7 ноября 2018 г., протокол № 12/18

Зав. кафедрой оптики и биофотоники,  
профессор, д.ф.-м.н.

Валерий Викторович Тучин



**Адрес:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83