

ОТЗЫВ

официального оппонента Потлова Антона Юрьевича
на диссертационную работу Советского Александра Александровича «Визуализация
деформаций и упругих свойств тканей на основе компрессионной оптической когерентной
эластографии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика»

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа посвящена расширению диагностических возможностей оптической когерентной томографии, в частности развитию методов количественной оценки упругих свойств биологических тканей на основе компрессионной оптической когерентной эластографии. Многие патологические процессы (воспаление, отек, неоплазия, фиброз и т.п.) характеризуются существенными изменениями в морфологической структуре пораженной ткани. Поскольку упругие свойства биологической ткани в основном зависят от ее морфологии, информация об изменениях в упругих свойствах имеет существенную диагностическую ценность. Разработка методов и технических средств для количественной оценки и тем более многомерной визуализации пространственных распределений упругих свойств биологических тканей представляет актуальную задачу для современной радиофизики. При этом особенно актуальной является проработка аспектов связанных с воспроизводимостью и однозначностью трактовки результатов измерений, в частности учет нелинейности зависимостей «напряжение-деформация» для подавляющего большинства биологических тканей, компенсация артефактов движения, эффекта прилипания и нелинейности границ исследуемой ткани. Не менее актуальными являются минимизация потенциальных негативных последствий от деформирующего воздействия на живую ткань, обеспечение высокого пространственного разрешения и вычислительной эффективности предлагаемых методов.

Следует отметить, что эластография биологических тканей может быть реализована не только с применением технологий низкокогерентной интерферометрии, также хорошо известны ультразвуковая и магнитно-резонансная эластография. Однако, лишь оптическая когерентная эластография в силу пространственного разрешения в диапазоне единиц микрон может рассматриваться, как неинвазивный аналог биопсии.

Таким образом, диссертационное исследование выполнено на актуальную и очень перспективную тематику.

Основные научные и практические результаты, значимость и новизна

Основным научным и практическим результатом диссертационного исследования является метод количественной оценки упругих свойств (в первую очередь, модуля Юнга) биологических тканей. Предложенный метод с аппаратной точки зрения базируется на использовании особого авторского датчика с эталонным силиконовым слоем для совместного получения интерференционных сигналов оптической когерентной томографии и величины упругого напряжения. При этом метрологические аспекты сбора и обработки исходных данных тщательно обоснованы. Обработка полученных результатов осуществляется с использованием уникальных авторских алгоритмов: I) адаптивной реконструкции пространственных распределений деформаций; II) корректировки найденных величин абсолютных смещений; III) расчета и визуализации пространственных распределений упругих свойств для стандартизованной величины локального давления; IV) расчета и визуализации кривых «напряжение-деформация» для отдельных областей интереса; V) автоматизированной сегментации полученных медицинских изображений.

Алгоритм адаптивной реконструкции пространственных распределений деформаций, отличается анализом фазочувствительных сигналов оптической когерентной томографии в векторной форме, в частности последовательно выполняемыми: комплексно-сопряженным перемножением начального и деформированного В-сканов; предварительным векторным усреднением по небольшому окну; созданием вектора, содержащего вертикальные приращения межкадровых фазовых вариаций; векторным усреднением по окну обработки. Адаптивность реконструкции заключается в использовании переменного коэффициента разрежения временных последовательностей В-сканов для учета скорости деформаций (чем медленнее процесс, тем выше соответствующий коэффициент) и переходе от расчета кумулятивной деформации, определяющей изменение толщины, к простой сумме относительных деформаций для учета больших (десятки процентов) деформаций. Алгоритм корректировки найденных величин абсолютных смещений включает в себя совокупность операций для компенсации артефактов движения, эффекта прилипания и нелинейности границ исследуемой ткани, в частности пересобирание исходных структурных изображений и перерасчет картограмм абсолютных смещений. Вышеуказанный алгоритм в сочетании с авторским датчиком с эталонным силиконовым слоем (позволяющим сглаживать возможную неоднородность напряжений на границе раздела ткань-стекло для не идеально плоской поверхности ткани) обеспечивает робастность получаемых результатов. Алгоритм расчета и визуализации

пространственных распределений упругих свойств для стандартизованной величины локального давления базируется на тщательно обоснованном утверждении, что силикон является высоко-линейным материалом, в котором кумулятивная деформация пропорциональна упругому напряжению. Алгоритм расчета и визуализации кривых «напряжение-деформация» для отдельных областей интереса обеспечивает итерационный процесс циклического расчета величины модуля Юнга для последовательно возрастающего (или снижающегося) механического напряжения. Расчеты базируются на тщательно обоснованном и экспериментально проверенном авторском предположении, что даже если несколько отличных друг от друга анатомических структур имеют одинаковую (в пределах погрешности) величину модуля Юнга при стандартизованной величине локального давления, кривые «напряжение-деформация» для этих структур будут демонстрировать отсутствие существенного перекрытия. Алгоритм автоматизированной сегментации полученных медицинских изображений осуществляет глубокую обработку полученных данных (авторская идея «квазистатической эластоспектроскопии»), и отличается тем, что автоматизированное выделение различных типов тканей может производиться с учетом не только величины модуля Юнга, но и параметра нелинейности.

Таким образом, разработаны: метод, полупрозрачный оптический датчик механического напряжения, метрологическое обеспечение, совокупность алгоритмов и программных продуктов – в целом, представляющие собой развитую технологию визуализации деформаций и упругих свойств биологических тканей. Предложенные решения пригодны для использования в реальной клинической практике, что подтверждается приведенными в диссертационном исследовании многочисленными результатами совместных экспериментов соискателя с авторитетными медицинскими специалистами.

Степень обоснованности научных положений, достоверность выводов и рекомендаций

Теоретическая база диссертационного исследования (1-я и 2-я главы) лаконично изложена и полностью адекватна цели и задачам исследования. Биологические ткани рассматривались соискателем как сильно рассеивающие нелинейно-упругие среды, что полностью соответствует современным биофизическим представлениям о них. Поразительно, но соискатель даже учел пороэластические свойства отдельных типов тканей.

Полученные интерференционные сигналы имеют характерную форму и динамические диапазоны, поэтому исправность и корректность работы используемого диссертантом научного оборудования сомнений не вызывает. Предложенные метод и алгоритмы базируются на самых современных представлениях о цифровой обработке биомедицинских сигналов и данных. Статистическая обработка данных выполнена в среде MATLAB на высоком профессиональном уровне.

Полученные практические результаты (3-я и 4-я главы) хорошо согласуются с теорией. Метрологическое обеспечение предложенного метода среди прочего включает в себя рекомендации по компенсации артефактов, связанных с эффектами прилипания, неровности границ и нелинейности исследуемой ткани.

Приведены убедительные результаты многочисленных верификационных экспериментов, в которых авторские эластограммы сравнивались с результатами ультразвуковой эластографии, классической биопсии и даже поляризационной структурной визуализации на основе оптической когерентной томографии. Расчетные величины модуля Юнга соответствуют данным из референтной научной литературы.

Отдельно следует отметить, очень высокое качество иллюстративного материала диссертационной работы и феноменальный уровень внедрения результатов диссертационного исследования в клиническую практику.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 16-и статьях в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах, в том числе: «Laser Physics Letters», «Современные технологии в медицине», «Journal of Biomedical Optics», «Journal of Biophotonics», «Biomedical Optics Express», «Photonics», «Materials». Соискатель является соавтором патента Российской Федерации на изобретение и обладателем 2-х свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертационного исследования докладывались на по меньшей мере 20-и научных конференциях.

Таким образом, достоверность результатов диссертационного исследования с точки зрения физики, математики, техники, биологии, медицины и т.п. сомнений не вызывает. Основные положения, выносимые на защиту грамотно сформулированы и тщательно обоснованы.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа производит исключительно положительное впечатление. Текст диссертации лаконичен, на 153-х страницах работы последовательно изложены

выкладки из теории, предлагаемые метод, аппаратные и программные усовершенствования, метрологическое обеспечение, результаты практической реализации предложенных решений. Приведены 173-и ссылки на референтную литературу.

Последовательность изложения подобрана таким образом, что обеспечивает единство внутренней структуры работы. Терминология корректна. Необходимые справочные данные представлены. Перекрестные ссылки между пунктами диссертации упрощают понимание материала. Диссертация наглядно проиллюстрирована (в работе 69 рисунков), причем многие из рисунков, поясняющих полученные результаты (3-я и 4-я главы) содержат в себе десятки подрисунков.

Критических замечаний по работе нет. Явные недостатки не обнаружены. В качестве мелкого замечания-пожелания, можно отметить, что одной из ключевых трудностей при переносе лабораторных решений в области оптической когерентной томографии (и особенно эластографии) в реальную клиническую практику является компенсация многочисленных артефактов движения. Соискателем при получении и обработке интерференционных сигналов этот аспект явно учитывался (качество полученных изображений это подтверждает), но в диссертации он описан лишь вскользь.

Выше представленное замечание-пожелание не носит принципиального характера, не снижает научной и практической значимости полученных автором результатов и не влияет на общую исключительно положительную оценку.

Научные результаты диссертационного исследования могут быть полезны широкому кругу специалистов, занимающихся научными исследованиями в области радиофизики, биофизики, биомедицинской инженерии, медицины. Практические результаты диссертационной работы могут быть востребованы широким кругом организаций, занимающихся разработкой, промышленным производством, внедрением и эксплуатацией медицинских диагностических систем с высокой степенью визуализации.

В целом, диссертационная работа Советского Александра Александровича «Визуализация деформаций и упругих свойств тканей на основе компрессионной оптической когерентной эластографии» представляет собой законченное самостоятельное научное исследование. Все поставленные задачи были успешно решены, а цель работы – достигнута.

Диссертационная работа «Визуализация деформаций и упругих свойств тканей на основе компрессионной оптической когерентной эластографии» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно пп. 9-14 Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Советский Александр Александрович заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Официальный оппонент:

доцент кафедры «Биомедицинская техника», старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Лаборатория медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)

Почтовый адрес: 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112Д, оф. 413

Телефон: +7 (4752) 63-56-20

E-mail: bmt@tstu.ru

Даю согласие на обработку своих персональных данных.

кандидат технических наук по специальности 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», доцент по специальности 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения»

 /Потлов Антон Юрьевич/

10 октября 2022 г.

Личную подпись Потлова Антона Юрьевича

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь Ученого совета

ФГБОУ ВО «ТГТУ»,

кандидат технических наук, доцент

 /Мозгова Галина Владимировна/

10 октября 2022 г.

