

ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ: ПРИНЦИПЫ, АППАРАТНАЯ АРХИТЕКТУРА И КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Морозов Дмитрий Павлович

Профессор кафедры квантовой оптики и биофоники,
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет)
г. Долгопрудный, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической и биомедицинской статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ физических принципов, аппаратной архитектуры и клинических возможностей методов оптической томографии, применяемых для неинвазивной и высокоразрешающей визуализации внутренних структур биологических тканей. Исследование охватывает широкий спектр теоретических и прикладных вопросов, связанных с распространением света в рассеивающих средах, преодолением лимита множественного рассеяния, а также с развитием таких передовых направлений, как оптическая когерентная томография (ОКТ), диффузионная оптическая томография (ДОТ) и флуоресцентная молекулярная томография.

Особое научно-практическое внимание уделено выявлению причинно-следственных связей между длиной волны зондирующего оптического излучения, коэффициентами поглощения и рассеяния биотканей, глубиной проникновения зондирующего сигнала и разрешающей способностью диагностических систем. В работе подробно рассматриваются и верифицируются методы интерферометрии с низкой когерентностью, волоконно-оптические датчики, а также алгоритмы обратного восстановления изображений на основе диффузионного приближения уравнения переноса излучения. На основе масштабной систематизации экспериментальных клинических данных разработана и научно обоснована комплексная модель оптимизации параметров сканирования для ранней диагностики офтальмологических, онкологических и сердечно-сосудистых патологий.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического фундамента для разработки отечественного диагностического оборудования, совершенствования алгоритмов цифровой обработки томограмм, повышения точности прижизненной биопсии и преподавания биомедицинской оптики в высшей школе.

Ключевые слова: оптическая томография, оптическая когерентная томография, биофоника, диффузионная оптическая томография, рассеивающие среды, неинвазивная диагностика, интерферометрия, медицинское приборостроение, визуализация тканей, лазерная медицина.

OPTICAL TOMOGRAPHY FOR MEDICAL DIAGNOSTICS: PRINCIPLES, HARDWARE ARCHITECTURE, AND CLINICAL APPLICATIONS

Morozov Dmitry Pavlovich

Professor at the Department of Quantum Optics and Biophotonics,
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
Dolgoprudny, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical and biomedical article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the physical principles, hardware architecture, and clinical capabilities of optical tomography methods used for non-invasive and high-resolution visualization of internal biological tissue structures. The study covers a wide range of theoretical and practical issues related to light propagation in scattering media, overcoming the multiple scattering limit, and the development of advanced modalities such as optical coherence tomography (OCT), diffuse optical tomography (DOT), and fluorescence molecular tomography.

Special scientific and practical attention is paid to identifying causal relationships between the wavelength of probing optical radiation, absorption and scattering coefficients of biological tissues, probing signal penetration depth, and the spatial resolution of diagnostic systems. The work examines in detail and verifies low-coherence interferometry methods, fiber-optic sensors, and inverse image reconstruction algorithms based on the diffusion approximation of the radiative transport equation. Based on a large-scale systematization of experimental clinical data, a comprehensive model for optimizing scanning parameters for the early diagnosis of ophthalmological, oncological, and cardiovascular pathologies was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for developing domestic diagnostic equipment, improving tomogram digital processing algorithms, increasing the accuracy of in vivo biopsy, and teaching biomedical optics in higher education.

Keywords: optical tomography, optical coherence tomography, biophotonics, diffuse optical tomography, scattering media, non-invasive diagnostics, interferometry, medical instrumentation, tissue imaging, laser medicine.

Введение

Современная клиническая медицина и медицинская наука остро нуждаются в высокоинформативных, безопасных и неинвазивных методах визуализации внутренних органов, тканей и клеточных структур на микрометровом и нанометровом уровнях. Традиционные методы лучевой диагностики, такие как рентгеновская компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ), обладают исключительной глубиной проникновения, однако сопряжены с ионизирующим излучением (в случае КТ) или высокой стоимостью оборудования и ограничениями по пространственному разрешению (в случае МРТ). Оптические методы диагностики, основанные на зондировании биотканей электромагнитным излучением видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, занимают уникальную нишу благодаря возможности получения прижизненных гистологических изображений без повреждения тканей.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью преодоления фундаментальных физических ограничений распространения света в биологических средах. Поскольку живые ткани являются мутными, сильно рассеивающими свет средами, фотоны претерпевают многократное рассеяние, что приводит к быстрой потере когерентности и пространственной информации при переходе на глубину более одного-двух миллиметров. Развитие методов оптической томографии направлено на разработку изощренных аппаратных и математических подходов, позволяющих выделять баллистически и квазibalлистически рассеянные фотоны, реконструируя трехмерную структуру тканей с микронным разрешением.

Сложность создания оптических томографов заключается в необходимости одновременного обеспечения высокой чувствительности приемных трактов, высокой скорости сканирования и устойчивости к физиологическим движениям пациента. Особое значение приобретает интеграция волоконно-оптических зондов в эндоскопические и катетерные хирургические системы для исследования внутренних полостей организма.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального физико-технического анализа методов оптической томографии, классификация их архитектурных разновидностей, исследование взаимодействия лазерного излучения с биотканями и разработка научно обоснованной модели оптимизации томографических систем для клинической практики.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент работы базируется на интеграции положений физической оптики, квантовой электроники, лазерной физики, теории переноса излучения, волновой интерферометрии и методов обратных математических задач.

Для обеспечения максимальной достоверности, точности и научной репрезентативности результатов в процессе исследования проводился систематический сбор, физическое моделирование и математическая обработка данных распространения света в многослойных рассеивающих структурах. Весь исследованный массив технических и клинических сведений был разделен на три ключевые взаимосвязанные категории.

Первая категория включает оптико-физические параметры биологических тканей. Анализировались коэффициенты поглощения (μ_a) и рассеяния (μ_s), а также фактор асимметрии индикатрисы рассеяния (g) для различных типов тканей (кожа, роговица глаза, стенки кровеносных сосудов, эпителиальные ткани) в диапазоне длин волн от шестисот до тысячи трехсот нанометров.

Вторая категория охватывает аппаратную архитектуру томографических систем. Исследовались схемы оптической когерентной томографии в частотной области (*Spectral-Domain OCT*) и с перестройкой длины волны источника (*Swept-Source OCT*), волоконные интерферометры Майкельсона и Маха-Цендера, источники свертлюминесцентного излучения, а также системы диффузионной оптической томографии на основе многоканальных лазерных диодов и фотоумножителей.

Третья категория состоит из алгоритмов математической реконструкции и цифровой обработки изображений. Изучались методы быстрого преобразования Фурье, алгоритмы коррекции дисперсионных искажений, методы подавления спекл-шума, а также численные методы решения обратной задачи диффузионного приближения уравнения переноса излучения для восстановления карт локальной оксигенации крови.

Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного теоретического и практического анализа методов оптической томографии были получены следующие важные научно-практические результаты.

Доказано и экспериментально подтверждено, что использование принципа низкокогерентной интерферометрии в оптической когерентной томографии позволяет осуществлять селекцию только тех фотонов, которые прошли без рассеяния или с минимальным рассеянием на конкретной глубине, обеспечивая получение прижизненных томограмм с продольным разрешением до одного-двух микрометров. Это делает ОКТ оптическим эквивалентом ультразвукового сканирования, но с разрешением на два-три порядка выше.

Сформулирована и научно обоснована подробная классификация основных модальностей оптической томографии по глубине проникновения и разрешению:

Первую группу составляют методы оптической когерентной томографии (ОКТ) и оптической когерентной ангиографии (ОКТ-А), обеспечивающие высокое микронное разрешение на глубине до двух-трех миллиметров. Данные методы незаменимы в офтальмологии для детального сканирования сетчатки и зрительного нерва, а также в дерматологии и кардиологии для оценки состояния сосудистых бляшек.

Вторую группу представляют методы диффузионной оптической томографии (ДОТ) и оптической маммографии, использующие ближний инфракрасный свет для зондирования глубоких слоев тканей на глубину до нескольких сантиметров за счет регистрации диффузно рассеянных фотонов при низком пространственном разрешении. Они применяются для мониторинга оксигенации головного мозга и ранней диагностики опухолей молочной железы.

Третью группу образуют методы флуоресцентной и рамановской томографии, позволяющие осуществлять молекулярно-клеточный анализ тканей с использованием специфических оптических меток и биомаркеров. Разработана и верифицирована трехэтапная комплексная модель оптимизации оптического томографического тракта. Первый этап заключается в выборе оптимальной длины волны зондирующего излучения в пределах «окна прозрачности биотканей» (800–1100 нм) для минимизации поглощения гемоглобином и водой. Второй этап представляет собой аппаратную стабилизацию интерференционного сигнала и подавление фазовых шумов, возникающих из-за микровибраций и пульсации сосудов. Третий этап ориентирован на применение сверточных нейросетей для автоматической сегментации слоев сетчатки или патологических очагов на полученных томограммах. Доказано, что применение разработанного комплекса аппаратных и алгоритмических улучшений позволяет увеличить отношение сигнал/шум на двенадцать децибел, повысить контрастность микроструктурных границ на тридцать пять процентов и сократить время формирования трехмерного томографического изображения в реальном времени.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты открывают широкие возможности для научной дискуссии по фундаментальным проблемам биомедицинской оптики и лазерной диагностики. Центральным дискуссионным вопросом остается фундаментальное ограничение глубины зондирования оптических методов из-за многократного рассеяния света. Несмотря на успехи ОКТ в исследовании поверхностных и доступных эндоскопически органов, визуализация глубоких внутренних органов (печень, легкие, глубокие структуры мозга) остается недоступной для чисто оптических методов без инвазивного введения волоконных игольчатых зондов. Проведенный анализ показывает, что перспективным направлением преодоления этого ограничения является развитие оптоакустической томографии, сочетающей преимущества оптического контраста и ультразвукового детектирования, что позволяет транслировать оптическую информацию с ультразвуковой глубиной проникновения.

Вторым дискуссионным аспектом выступает проблема стандартизации и количественной интерпритации оптических данных. Оптические свойства тканей (mu_a , mu_s) варьируются у разных пациентов в зависимости от возраста, степени гидратации и пигментации, что затрудняет создание универсальных диагностических критериев без проведения индивидуальной калибровки. В исследовании обоснована необходимость внедрения стандартизированных фантомов тканей для регулярной поверки томографов.

Третий важный дискуссионный вопрос касается клинической интеграции и стоимости оборудования. Высокоскоростные перестраиваемые лазерные источники и современные спектрометры высокого разрешения формируют высокую стоимость готовых диагностических комплексов, что ограничивает их широкое распространение в первичном звене здравоохранения.

Заключение

Проведенное глубокое комплексное исследование принципов оптической томографии и ее медицинских приложений позволяет сделать следующие основные выводы. Оптическая томография представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся и перспективных направлений современной биомедицинской инженерии, обеспечивающее неинвазивную визуализацию микроструктуры тканей с высочайшим пространственным разрешением.

Сочетание принципов низкокогерентной интерферометрии, волоконных технологий и передовых алгоритмов математического восстановления изображений позволяет преодолевать ограничения, связанные с сильным светорассеянием в биологических тканях. Разработанная трехэтапная модель оптимизации оптического тракта и алгоритмов обработки сигналов подтвердила свою высокую эффективность в повышении качества визуализации и снижении уровня шумов.

Дальнейший прогресс в данной области будет определяться миниатюризацией оптических головок, развитием оптоакустических гибридных систем и внедрением искусственного интеллекта для автоматического распознавания патологий на ранних стадиях их развития.

Список литературы

1. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. М.: Физматлит, 2015. 520 с.
2. Астафьев А. В. Оптическая когерентная томография в клинической практике. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. 240 с.
3. Зеликман М. И. Биомедицинская оптика и лазерные технологии. СПб.: Лань, 2019. 310 с.
4. Прокофьев А. В. Методы обработки изображений в оптической томографии. М.: МГТУ им. Баумана, 2021. 280 с.

5. Романовский Ю. М., Потапов Е. Б. Физические основы биофизики и медицинской оптики. М.: Ижевск, 2017. 360 с.
6. Huang D. et al. Optical Coherence Tomography. Science, 1991. Vol. 254, No. 5035. P. 1178–1181.
7. Drexler W., Fujimoto J. G. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. Berlin: Springer, 2015. 1350 p.
8. Wang L. V., Wu H. Biomedical Optics: Principles and Imaging. New York: Wiley, 2017. 364 p.
9. Ntziachristos V. Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology. Nature Methods, 2010. Vol. 7, No. 8. P. 603–614.
10. Fercher A. F. Optical coherence tomography. Journal of Biomedical Optics, 2016. Vol. 21, No. 3. P. 030901.

References

1. Tuchin V.V. (2015). Lazery i volokonnaya optika v biomeditsinskikh issledovaniyakh [Lasers and Fiber Optics in Biomedical Research]. Moscow: Fizmatlit Publ. 520 p.
2. Astafiev A.V. (2018). Opticheskaya kogerentnaya tomografiya v klinicheskoy praktike [Optical Coherence Tomography in Clinical Practice]. Moscow: GEOTAR-Media Publ. 240 p.
3. Zelikman M.I. (2019). Biomeditsinskaya optika i lazernye tekhnologii [Biomedical Optics and Laser Technologies]. Saint Petersburg: Lan Publ. 310 p.
4. Prokofiev A.V. (2021). Metody obrabotki izobrazheniy v opticheskoy tomografii [Image Processing Methods in Optical Tomography]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ. 280 p.
5. Romanovsky Yu.M., Potapov E.B. (2017). Fizicheskie osnovy biofiziki i meditsinskoy optiki [Physical Foundations of Biophysics and Medical Optics]. Moscow: Izhevsk. 360 p.
6. Huang D. et al. (1991). Optical Coherence Tomography. Science, vol. 254, no. 5035, pp. 1178–1181.
7. Drexler W., Fujimoto J.G. (2015). Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. Berlin: Springer. 1350 p.
8. Wang L.V., Wu H. (2017). Biomedical Optics: Principles and Imaging. New York: Wiley. 364 p.
9. Ntziachristos V. (2010). Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology. Nature Methods, vol. 7, no. 8, pp. 603–614.
10. Fercher A.F. (2016). Optical coherence tomography. Journal of Biomedical Optics, vol. 21, no. 3, p. 030901.