

Визуализация анатомических структур биологических тканей посредством оптической когерентной томографии с морфологической обработкой данных

Аннотация

Описан новый метод снижения общего уровня спекл-шумов на структурных изображениях в оптической когерентной томографии (ОКТ). Предложенный подход базируется на сочетании многоуровневой многоцелевой фильтрации и циклической морфологической обработке интерференционных сигналов. Метод включает в себя многократно выполняемую морфологическую эрозию спекл-структур и морфологическое расширение остальных частей структурного ОКТ-изображения. Предлагаемый подход может быть использован в оптической когерентной эластографии для определения контрольных точек на структурных ОКТ-изображениях до и после деформирующего воздействия.

Введение

Оптическая когерентная томография (ОКТ) базируется на принципах низкокогерентной интерферометрии [1]. Структурные изображения (В-сканы) исследуемого биологического объекта строятся на основе детектирования и анализа результатов интерференции волн опорного плеча и плеча образца. Такой подход обеспечивает высокое пространственное разрешение получаемых структурных изображений [2], однако детектируемый сигнал содержит в себе многочисленные результаты интерференции вторичных сферических волн, так называемые спекл-шумы.

Поскольку на структурных изображениях спекл-шумы проявляются в виде пятнистости (спекл-структур), не характеризующей реальное оптическое строение исследуемого биологического объекта, актуальной задачей является разработка различных подходов к минимизации негативного влияния спекл-шумов на диагностическую ценность медицинской визуализации методом ОКТ [3], [4].

Современные подходы к снижению уровня спекл-шумов на структурных изображениях в ОКТ делятся на два вида: аппаратные [1], [5] и алгоритмические [6], [7]. Преимуществом аппаратных методов является достижение в отдельных случаях высокого качества получаемых изображений, а недостатком – узкая специализация. Алгоритмы снижения спекл-шумов чаще всего основываются на их идентификации по некоторым пороговым величинам базовых характеристик интерференционного сигнала и последующем удалении спекл-шумов как

участков интерференционного сигнала, соответствующих пикам интенсивности, нарушениям фазы и т. п. Такие подходы позволяют получать структурные изображения с довольно высоким качеством, а также отличаются универсальностью. Однако удаление пиков интенсивности – довольно неизбирательное действие, в ряде случаев удаляемому пику может соответствовать реальная структура в исследуемом объекте. Фазовые сдвиги, в свою очередь, могут соответствовать потокам биологических жидкостей (крови, лимфы) в сосудах сквозь плоскость ОКТ-сканирования.

Предлагаемый в статье подход является алгоритмическим и базируется на идентификации (для последующего удаления) спекл-структур не только по их интенсивности, но и по характерной геометрии [8], что снижает вероятность потери полезной информации.

Материалы и методы

Основные этапы предлагаемого подхода к получению структурных ОКТ-изображений со сниженным уровнем спекл-шумов представлены на *рис. 1*, 2.

Вначале задаются параметры (*рис. 1*), управляющие считыванием и обработкой интерференционного сигнала, и производится его получение с детекторов ОКТ-системы или из файла.

Для удаления различных шумов интерференционные сигналы подвергаются предварительной обработке, в частности пороговому ограничению и полосовой фильтрации с использованием фильтра Баттерворта 3-го порядка [7]. Далее сово-

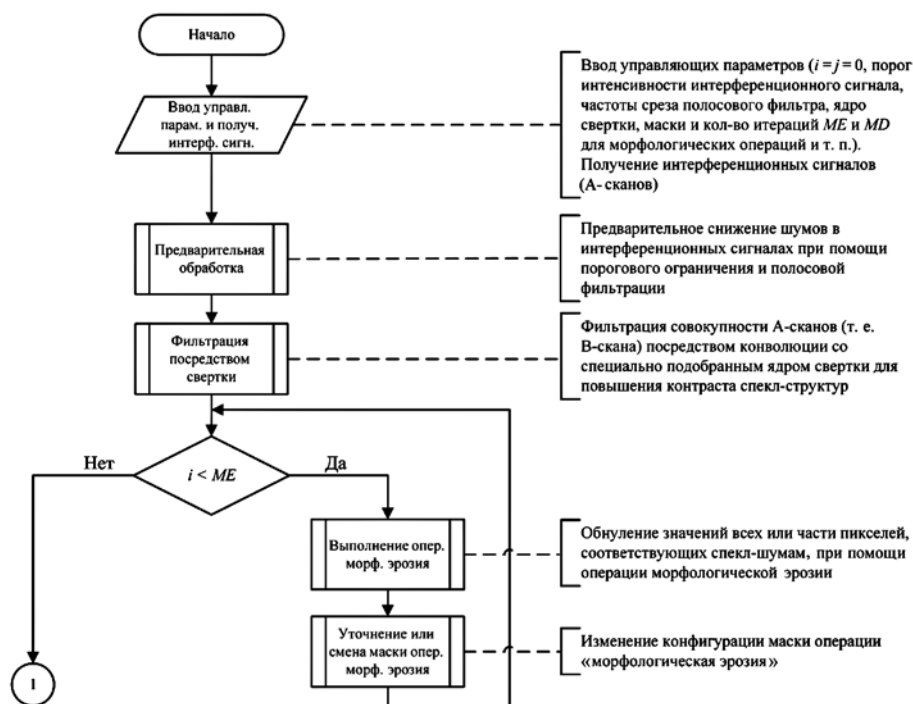


Рис. 1. Этапы предварительной обработки и морфологической эрозии ОКТ-изображений

купность интерференционных сигналов для контрастирования оставшихся спекл-структур подвергают фильтрации посредством свертки, при этом В-скан обрабатывают с использованием матрицы конволюции, специально предназначенной для повышения контраста мелких деталей на изображении и имеющей следующий вид:

$$Kernel(3 \times 3) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 7 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Производят две стадии морфологической обработки получившегося частично очищенного от шумов структурного изображения OCT_{st} исследуемого биологического объекта [9] с контрастными спекл-структурами (рис. 1, 2). Первая стадия (рис. 1) – однократно или многократно выполняемая операция морфологической эрозии изображения OCT_{st} структурным элементом SP с формой и размерами, характерными для спекл-структур:

$$OCT_{st-e} = OCT_{st} \odot SP = \{z \in OCT_{st} \mid SP_z \in OCT_{st}\}.$$

Эта стадия обеспечивает резкое снижение количества и общей площади спекл-структур на структурном изображении OCT_{st-e} , поскольку все структуры, по размеру и морфологии сходные с используемой или используемыми, в случае многократного выполнения морфологической эрозии масками обнуляются.

Вторая стадия (рис. 2) – однократно или многократно выполняемая операция морфологического расширения:

$$OCT_M = OCT_{st-e} \otimes RS = \bigcup_{b \in RS} OCT_b^{st-e}.$$

Эта стадия обеспечивает заполнения всех или части обнуленных при выполнении операции морфологической эрозии пикселей аппроксимированным полезным сигналом, т. е. приводит к наращиванию размера и площади реально существующих структур RS на обрабатываемом изображении OCT_{st-e} .

Очищенное от большей части шумов структурное изображение OCT_M для дополнительного снижения аддитивного и импульсного шумов сглаживается с использованием медианного фильтра [10]. Результат обработки визуализируется.

Результаты и обсуждение

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является сочетание многоуровневой многоцелевой фильтрации и циклической морфологической обработки интерференционных сигналов.

Использование порогового ограничения и полосовой фильтрации для предварительной обработки А-сканов позволяет осуществить шумоподавление на начальных стадиях обработки исходных данных ОКТ-сканирования. Выполняемая перед морфологической обработкой В-сканов фильтрация посредством свертки обеспечивает повышения контраста границ, не удалившихся при предварительной обработке спекл-структур. Эти структуры с повышенным контрастом более эффективно обнаруживаются и удаляются посредством операции морфологической эрозии. Медианная фильтрация как завершающая стадия обработки обеспечивает сглаживание полученных структурных изображений.

Циклическая морфологическая обработка является основой предлагаемого подхода и базируется на том факте, что геометрические особенности и количество спеклов на структурных ОКТ-изображениях статистически предсказуемы и зависят от характеристик излучения, особенностей сканирования и детектирования. То есть морфологические особенности спекл-шумов на сериях структурных ОКТ-изображений неподвижных объектов, получаемых одним и тем же прибором, будут в некоторой мере сходными, а это значит, что можно обнаружить и удалить (обнулить) спекл-шумы со структурных изображений исследуемого объекта посредством операции морфологической эрозии с относительно небольшими потерями полезного сигнала. К тому же при помощи операции морфологического расширения можно заполнить обнуленные пиксели аппроксимированным полезным сигналом. При этом эффективность морфологической обработки во многом сводится к правильному подбору масок операций морфологической эрозии и расширения. Для большей управляемости целесообразно использовать маски с небольшой размерностью, например 5×5 .

Представленный подход был практически реализован в виде программного продукта с использованием среды разработки LabVIEW. На рис. 3 и 4 показаны результаты его рабо-

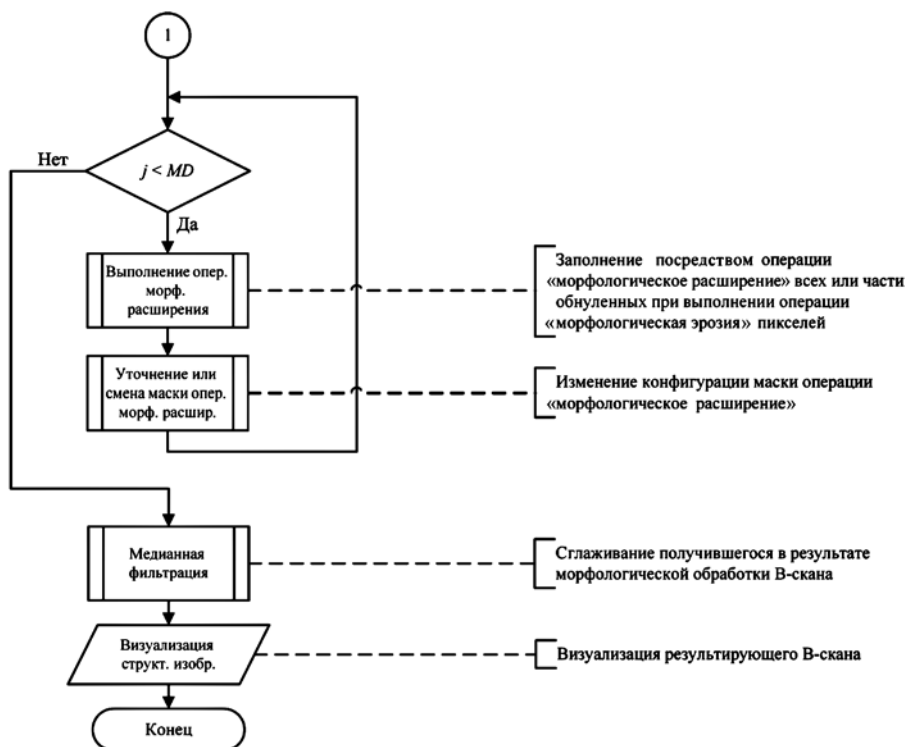


Рис. 2. Этапы морфологического расширения и финишной обработки ОКТ-изображений

ты на примере ОКТ-изображений мягких тканей говяжьей печени *ex vivo*.

Повышение отношения сигнал/шум составило $\approx 19\%$ (рис. 3) и $\approx 23\%$ (рис. 4), а повышение контраста структурного ОКТ-изображения в обоих случаях превысило 28 %. Пороговый уровень соответствия маскам задавался равным 75 %. Затраты машинного времени на формирование ОКТ-изображения с повышенным качеством составили 0,12 и 0,15 с соответственно, что соответствует диалоговому режиму работы.

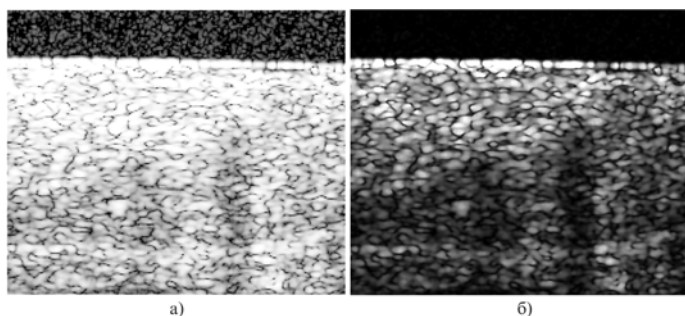


Рис. 3. Структурные ОКТ-изображения паренхимы говяжьей печени *ex vivo*: а) классическая обработка; б) обработка по предложенному алгоритму

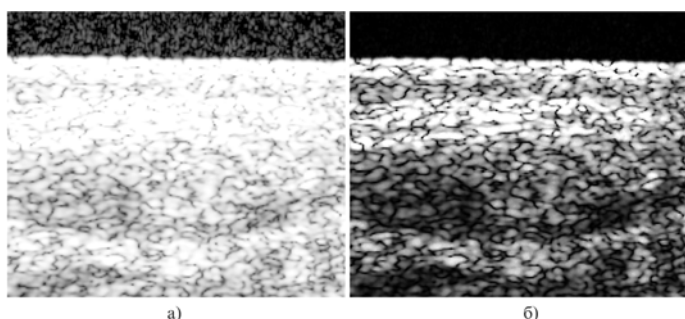


Рис. 4. Структурные ОКТ-изображения стенки кровеносного сосуда говяжьей печени *ex vivo*: а) классическая обработка; б) обработка по предложенному алгоритму

Закключение

Представлен оригинальный подход к получению в диалоговом режиме работы структурных ОКТ-изображений со сниженным уровнем спекл-шумов, достигнутым посредством использования многоуровневой многоцелевой фильтрации и циклической морфологической обработки интерференционных сигналов. Пороговое ограничение, полосовая и медианная фильтрация позволяют снизить общий уровень шумов в интерференционном сигнале. Фильтрация посредством свертки позволяет повысить контраст спекл-структур на В-сканах. Маски операции морфологической эрозии подбираются таким образом, чтобы соответствовать характерной геометрии более контрастных, чем обычно, спекл-структур на структурных изображениях исследуемого биологического объекта. После этого операция морфологической эрозии позволяет обнаружить и обнулить данные спекл-структуры. Операция морфологического расширения обеспечивает наращивание размера и площади реально существующих структур исследуемого биологического объекта за счет обнуленных пикселей, оставшихся после удаления спекл-структур [3].

Важно отметить, что посредством однократного подбора набора масок операций морфологического расширения и морфологической эрозии можно легко адаптировать предлагаемый подход к конкретной ОКТ-системе.

Серия компьютерных экспериментов [8] с разработанным программным обеспечением показала устойчивое повышение отношения сигнал/шум и контраста получаемых структурных изображений при использовании разработанного алгоритма. В рассмотренных примерах (рис. 3, 4) эти параметры соответственно увеличились на более чем 19 и 28 %.

Предлагаемый подход к снижению уровня спекл-шумов на структурных изображениях может быть использован в ОКТ, а

также в оптической когерентной эластографии [11], [12], когда по контрольным точкам на структурных ОКТ-изображениях до и после деформирующего воздействия вычисляют абсолютные и относительные смещения отдельных структур и другие биомеханические характеристики исследуемой ткани [4]. После незначительной доработки возможны другие медицинские и научные применения (например в УЗИ, в системах для астрономических исследований и т. п.).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-10327).

Список литературы:

1. Chen X., Lu J., Li P. Elastography with low-frame-rate laser speckle contrast imaging using the aliasing effect // *Optics Letters*. 2018. Vol. 43 (12). PP. 2811-2814.
2. Gora M.J., Suter M.J., Tearney G.J., Li X. Endoscopic optical coherence tomography: Technologies and clinical applications // *Biomedical Optics Express*. 2017. Vol. 8 (5). PP. 2405-2444.
3. Фролов С.В., Потлов А.Ю. Система эндоскопической оптической когерентной томографии с повышенной точностью позиционирования катетера // *Медицинская техника*. 2019. № 1. С. 5-8.
4. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. Young's modulus evaluation for blood vessel equivalent phantoms using optical coherence elastography // *Proceedings of SPIE*. 2019. Vol. 11065. Art. No. 110650X.
5. Zaitsev V.Y., Matveyev A.L., Matveev L.A., Gelikonov G.V., Sovetsky A.A., Vitkin A. Optimized phase gradient measurements and phase-amplitude interplay in optical coherence elastography // *Journal of Biomedical Optics*. 2016. Vol. 21 (11). Art. No. 116005.
6. Liang S., Saidi A., Jing J., Liu G., Li J., Zhang J., Sun C., Narula J., Chen Z. Intravascular atherosclerotic imaging with combined fluorescence and optical coherence tomography probe based on a double-clad fiber combiner // *Journal of Biomedical Optics*. 2012. Vol. 17 (7). Art. No. 0705011.
7. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. An algorithm for speckle noise reduction in endoscopic optical coherence tomography structural imaging // *Proceedings of SPIE*. 2019. Vol. 11065. Art. No. 110650W.
8. Фролов С.В., Потлов А.Ю., Синдеев С.В. Выбор модели потоконаправляющего стента на основе использования когерентной оптической томографии и математического моделирования гемодинамики // *Медицинская техника*. 2017. № 6. С. 4-7.
9. Bashkatov A.N., Genina E.A., Tuchin V.V. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2011. Vol. 4. PP. 9-38.
10. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Frolova T.A., Proskurin S.G. Compression elastography and endoscopic optical coherence tomography for biomechanical properties evaluation of cerebral arteries walls with aneurysm and their phantoms // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2140. Art. No. 020020.
11. Zvietcovich F., Rolland J.P., Yao J., Meemon P., Parker K.J. Comparative study of shear wave-based elastography techniques in optical coherence tomography // *Journal of Biomedical Optics*. 2017. Vol. 22 (3). Art. No. 035010.
12. Larin K.V., Sampson D.D. Optical coherence elastography – OCT at work in tissue biomechanics // *Biomedical Optics Express*. 2017. Vol. 8 (2). PP. 1172-1202.

Антон Юрьевич Потлов,
канд. техн. наук, доцент,
Сергей Владимирович Фролов,
д-р техн. наук, профессор,
Сергей Геннадьевич Проскурин,
д-р техн. наук, доцент,
кафедра «Биомедицинская техника»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов,
e-mail: sergej.frolov@gmail.com