

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СПЕКЛ-СТРУКТУР ДЛЯ НУЖД КАРТИРОВАНИЯ ПОТОКОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, Т. А. Фролова

*Кафедра «Биомедицинская техника», bmt@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: растровое усреднение; структурная реконструкция изображений; эндоскопическая оптическая когерентная томография.

Аннотация: Представлен метод цветового доплеровского картирования для офтальмологических приложений оптической когерентной томографии (ОКТ). Предложенный метод разработан с учетом закономерностей, связывающих изменения в интерференционном сигнале с вызывающими их изменениями в характеристиках потока биологической жидкости сквозь плоскость ОКТ-сканирования. Ключевой особенностью предложенного алгоритма является многоступенчатый анализ флуктуаций спекл-структуры ОКТ-изображений. Идентификация спекл-структур проводится посредством использования функций реверсирования цветов, свертки с использованием заданного ядра конволюции, пороговых ограничений, морфологической обработки, формирования выпуклых оболочек, градиентных операций и перекодирования изображений.

Введение

Режим цветового доплеровского картирования является неотъемлемой частью современных оптических когерентных томографов (ОКТ) [1 – 8]. В большинстве приборов он реализован по аналогии с режимом цветового доплеровского картирования в ультразвуковых системах (УЗИ) [9]. Данное решение верное, поскольку методы ОКТ и УЗИ имеют много сходств, но при этом не стоит забывать и о принципиальных различиях. Анализ движения ультразвуковой волны во многом сводится к учету многочисленных отражений и преломлений на границах раздела сред. Ультразвуковые колебания можно считать распространяющимися прямолинейно и с постоянной скоростью в однородных средах. Это объясняет высокую эффективность метода УЗИ в задачах оценки размеров и экзогенности (гомогенности для ультразвука, то есть относительной однородности) внутренних органов и их отдельных частей при весьма низком пространственном разрешении. Распространение инфракрасного излучения не может описываться только актами отражения и преломления на границах раздела сред. Влияние поглощения и особенно рассеяния очень велико. В ультразвуковых системах источник излучения чаще всего является и его приемником (прямой и обратный пьезоэффекты). В ОКТ-системах источник изучения и его приемник находятся в разных местах, что создает дополнительные помехи.

В связи с вышесказанным, в УЗИ-системах для эффективной организации режима цветового доплеровского картирования вполне достаточно анализа сдвигов несущей частоты. Есть дефицит полезного сигнала для цветового доплеровского картирования в ОКТ. Для корректной работы данного режима картирования желателен анализ сдвигов несущей частоты, сдвигов фазы, спекл-контраста.

Методы анализа сдвигов несущей частоты и фазы хорошо изучены и описаны в референтных источниках. Методы анализа флуктуаций спекл-шумов могут быть усовершенствованы. Неочевидным местом многих методов анализа спекл-шумов

является этап идентификации спеклов. Поэтому ряд решений по анализу флуктуаций спекл-шумов работает напрямую с интенсивностью пикселей ОКТ-скана, что не вполне корректно.

Цель проводимых исследований – создание эффективного метода цветового доплеровского картирования в ОКТ за счет создания эффективного алгоритма идентификации спекл-структур.

Материалы и методы

Последовательность действий по оценке скоростей потоков биологических жидкостей в ОКТ схематично показана на рис. 1. Первым действием является получение исходных данных, которые представляют собой последовательность интерференционных сигналов с учетом временных и пространственных меток, описывающих процесс их получения. Следующим действием является обработка структурных ОКТ-изображений специальным фильтром для повышения контраста мелких деталей, таких как спекл-структуры. В предложенном методе использована конволюция с ядром размером 9×9 . Центральный элемент равен 100, остальные единице.

Далее спекл-шумы выделяются с некоторой степенью вероятности с помощью операции порогового ограничения. Использованный порог составил $2/3$ от максимальной интенсивности.

Операция морфологической эрозии применяется для снижения количества ложных срабатываний. При выполнении данной операции использован набор масок с типичной для спекл-шумов геометрией. Следующим действием является удаление объектов площадью ниже пороговой для упрощения дальнейших расчетов и дополнительного снижения количества ложных срабатываний. В предлагаемом методе удалены все структуры размером менее пяти пикселей.

Далее проводится разделение единого поля интенсивностей на участки с характерной текстурой, форма которых восстанавливается в виде выпуклых оболочек. Эти оболочки, по сути, представляют собой аппроксимированные многогранники спекл-структуры.

Контурные выпуклых оболочек выделяются градиентным методом. Бинарные данные преобразуются в градации серого. Затем найденная картограмма контуров объектов комбинируется с исходным изображением. Найденные картограммы используются для классических расчетов скоростей потоков на основе анализа флуктуаций спекл-структуры. Результаты вычисления скоростей потоков биологических жидкостей на основе анализа доплеровских сдвигов, фазовых сдвигов и спекл-контраста усредняются и выводятся пользователю.

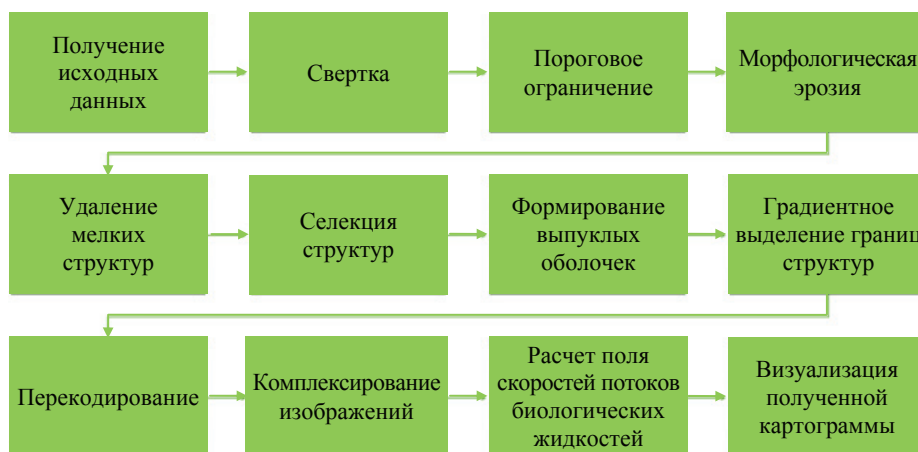


Рис. 1. Ключевые этапы алгоритма обработки ОКТ-сигналов для оценки скоростей потоков биологических жидкостей

Результаты и обсуждение

Предложенный метод идентификации потоков биологических жидкостей практически реализован с использованием среды LabVIEW. Одно из 50 обрабатываемых структурных ОКТ-изображений, полученных с временными интервалами 0,015 с, показано на рис. 2, *а*. В качестве исследуемого объекта использовался фантом кровеносного сосуда, изготовленный из прозрачного жидкого силикона Sorta-Clear 18 (фирма Smooth-On, США) методом литья. В качестве специальных добавок использовались поглощающие и рассеивающие агенты, в частности краситель Indian Ink Black и наночастицы диоксида титана TiO_2 . Эти добавки позволили придать фантому оптические свойства, как у реальных мягких биологических тканей. Цельная кровь имитировалась посредством использования 1%-го раствора интралипида в воде. Сложная структура потока получена с использованием специального устройства для формирования пульсирующих и вибрирующих потоков. Пульсации созданы посредством управляемого скручивания гибкой трубки для подачи кровеимитирующей жидкости. Вибрации (имитация тремора исследуемого объекта) формировались с помощью вибромотора. Результат идентификации сформированного потока представлен на рис. 2, *б*.

Ключевой отличительной особенностью предложенного метода является понятная процедура идентификации спекл-шумов, которая позволит проводить вычисление спекл-контраста по классическим формулам не для всех пикселей изображения, а непосредственно для спекл-структур. Пошаговые преобразования в обрабатываемых ОКТ-сканах показаны на рис. 3 и 4.

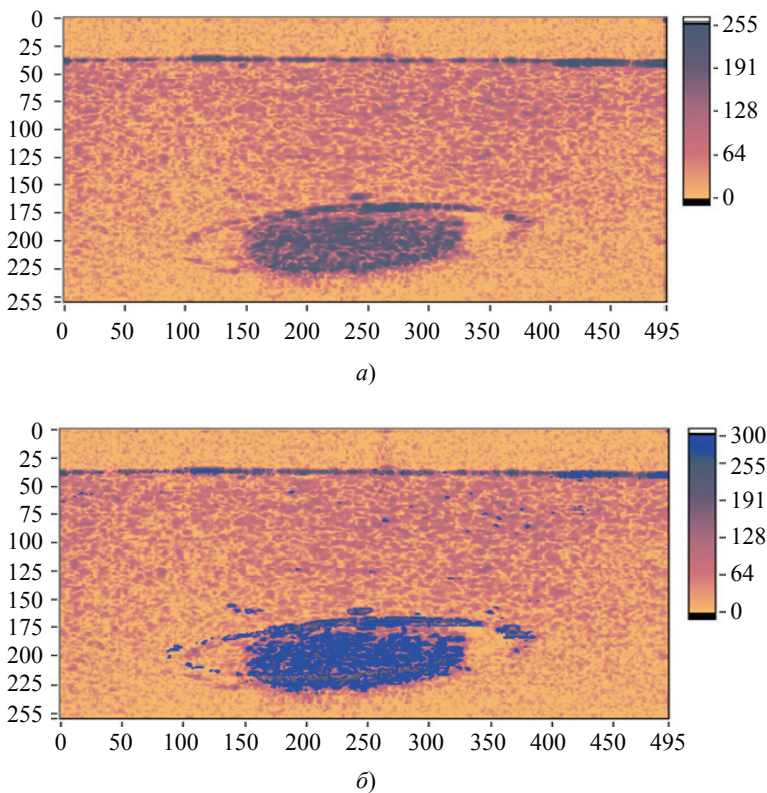


Рис. 2. Результат работы предложенного метода:

а – одно из исходных структурных ОКТ-изображений обрабатываемой последовательности;
б – результат локализации потока биологической жидкости

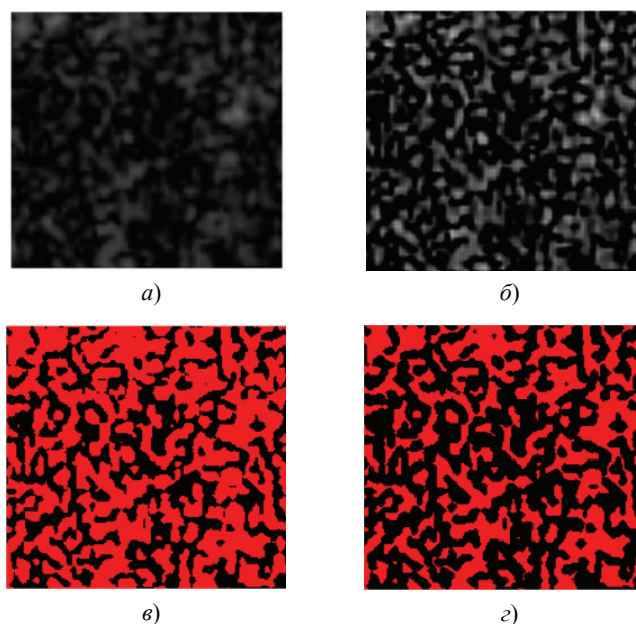


Рис. 3. Примеры преобразований структурного ОКТ-изображения в соответствии с начальными этапами предложенного метода:
a – исходная спекл-структура на ОКТ-скане; *б, в, г* – соответственно результаты конволюции, порогового ограничения, морфологической эрозии

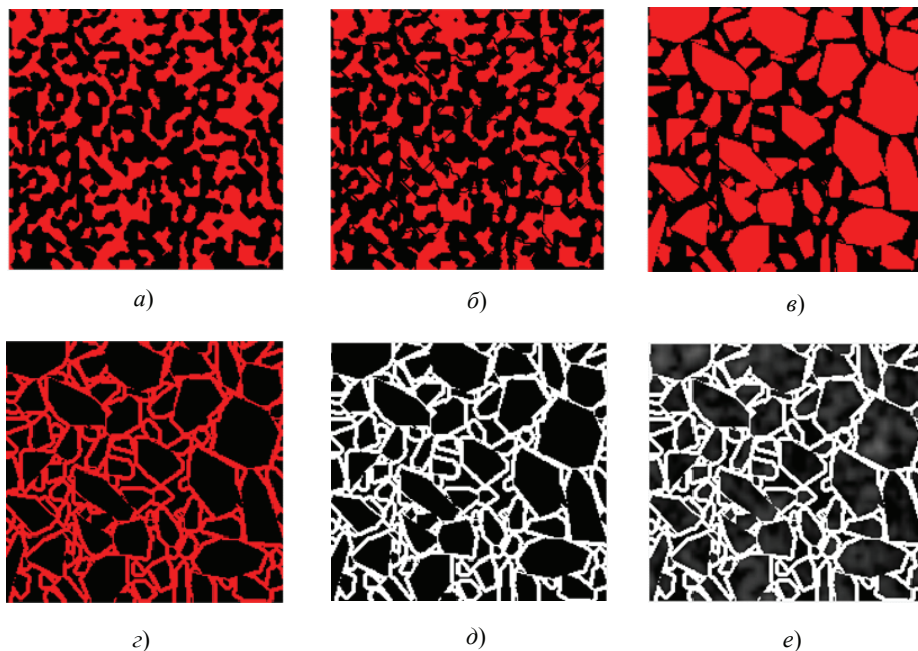


Рис. 4. Примеры преобразований структурного ОКТ-изображения в соответствии с финальными этапами предложенного метода:
a, б, в – соответственно результаты удаления излишне мелких объектов, сепарации объектов, формирования выпуклых оболочек; *г, д, е* – соответственно результаты градиентной операции, переквантования, комплексирования

Ключевым преимуществом предложенного метода является высокая точность производимых вычислений. Достоверность идентификации потока кровеимитирующей жидкости в рассмотренном примере составила более 89 % без использования экзогенных контрастных веществ. Представленные модификации не требуют серьезных затрат машинного времени, которые в рассматриваемом примере составили менее 1 с. Эта величина может быть дополнительно снижена за счет использования параллельных вычислений на графических процессорах.

Заключение

Представлен метод высокоэффективной идентификации потоков биологических жидкостей. Ключевой отличительной особенностью предложенного метода является видоизмененная процедура анализа флуктуаций спекл-структуры. Спекл-контраст предложено анализировать не для всех пикселей совокупности структурных ОКТ-изображений, а только для тех, которые действительно относятся к спекл-структуре. Спекл-структуры идентифицируются с использованием процедур свертки, порогового ограничения, морфологической обработки, сепарации элементов по размерам и текстуре, формирования выпуклых оболочек, градиентного выделения границ, а также комплексирования и записи полученных результатов.

Предложенный метод пригоден для совместного использования с классическими методами оценки скоростей потоков биологических жидкостей на основе анализа доплеровских сдвигов несущей частоты, фазовых сдвигов и спекл-контраста.

Список литературы

1. Optimized Phase Gradient Measurements and Phase-Amplitude Interplay in Optical Coherence Elastography / V. Y. Zaitsev, A. L. Matveyev, L. A. Matveev [et al.] // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – Vol. 21, Issue 11. – P. 116005-1 – 116005-12. doi: 10.1117/1.JBO.21.11.116005
2. Proskurin, S. G. Doppler Mapping of an Alternating-Sign Flow with Complex Geometry Using Optical Coherence Tomography / S. G. Proskurin, A. Yu. Potlov, S. V. Frolov // Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 44, No. 1. – P. 54 – 58. doi: 10.1070/QE2014v044n01ABEH015232
3. Proskurin, S. G. One Specific Velocity Color Mapping Using Optical Coherence Tomography / S. G. Proskurin, A. Yu. Potlov, S. V. Frolov // Journal of Biomedical Optics. – 2015. – Vol. 20, Issue 5. – P. 051034-1 – 051034-6. doi: 10.1117/1.JBO.20.5.051034
4. Potlov, A. Yu. Color Mapping of one Specific Velocity of a Biological Fluid Flows with Complex Geometry Using Optical Coherence Tomography / A. Yu. Potlov, S. V. Frolov, S. G. Proskurin // Optical Technologies in Biophysics & Medicine XIX : Proceedings of Fifth International Symposium on Optics and Biophotonics, 26 – 30 September, 2017, Saratov. – 2018. – Vol. 10716. – P. 107160A. doi: 10.1117/12.2314439
5. Potlov, A. Yu. An Algorithm for Improving the Quality of Structural Images of Turbid Media in Endoscopic Optical Coherence Tomography / A. Yu. Potlov, S. V. Frolov, S. G. Proskurin // Optical Technologies in Biophysics & Medicine XIX : Proceedings of Fifth International Symposium on Optics and Biophotonics, 26 – 30 September, 2017, Saratov. – 2018. – Vol. 10716. – P. 1071609. doi: 10.1117/12.2314967
6. Wang, R. K. Doppler Optical Micro-Angiography for Volumetric Imaging of Vascular Perfusion in Vivo / R. K. Wang, L. An // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, Issue 11. – P. 8926 – 8940. doi: 10.1364/OE.17.008926

7. Two-Dimensional Phase Unwrapping in Doppler Fourier Domain Optical Coherence Tomography / Y. Wang, D. Huang, Y. Su, X. S. Yao // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 24, Issue 23. – P. 26129 – 26145. doi: 10.1364/OE.24.026129

8. Common-Path Phase-Sensitive Optical Coherence Tomography Provides Enhanced Phase Stability and Detection Sensitivity for Dynamic Elastography / G. Lan, M. Singh, K. V. Larin, M. D. Twa // *Biomedical Optics Express*. – 2017. – Vol. 8, Issue 11. – P. 5253 – 5266. doi: 10.1364/BOE.8.005253

9. High-Resolution Coregistered Intravascular Imaging with Integrated Ultrasound and Optical Coherence Tomography Probe / X. Li, J. Yin, C. Hu [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 97, Issue 13. – P. 133702. doi: 10.1063/1.3493659

Identification of Speckle Structures for the Needs of Mapping of Biological Fluids

S. V. Frolov, A. Yu. Potlov, T. A. Frolova

Department of Biomedical Engineering, bmt@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: Endoscopic Optical Coherence Tomography; structural image reconstruction; raster averaging.

Abstract: A color Doppler mapping method for ophthalmic applications of optical coherence tomography (OCT) is presented. The proposed method was developed taking into account the regularities that link changes in the interference signal with the changes in the characteristics of the flow of biological fluid through the OCT scanning plane that cause them. The key feature of the proposed algorithm is the multistage analysis of fluctuations in the speckle structure of OCT images. Speckle structures are identified by using the functions of color reversal, convolution using a given convolution kernel, threshold constraints, morphological processing, convex hull formation, gradient operations, and image recoding.

References

1. Zaitsev V.Y., Matveyev A.L., Matveev L.A. [et al.] Optimized Phase Gradient Measurements and Phase-Amplitude Interplay in Optical Coherence Elastography, *Journal of Biomedical Optics*, 2016, vol. 21, issue 11, pp. 116005-1-116005-12, doi: 10.1117/1.JBO.21.11.116005

2. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. Doppler Mapping of an Alternating-Sign Flow with Complex Geometry Using Optical Coherence Tomography, *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 1, pp. 54-58, doi: 10.1070/QE2014v044n01ABEH015232

3. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. One Specific Velocity Color Mapping Using Optical Coherence Tomography, *Journal of Biomedical Optics*, 2015, vol. 20, issue 5, pp. 051034-1-051034-6, doi: 10.1117/1.JBO.20.5.051034

4. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. Optical Technologies in Biophysics & Medicine XIX, Proceedings of Fifth International Symposium on Optics and Biophotonics, 26 - 30 September, 2017, Saratov, 2018, vol. 10716, p. 107160A, doi: 10.1117/12.2314439

5. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. Optical Technologies in Biophysics & Medicine XIX, Proceedings of Fifth International Symposium on Optics and Biophotonics, 26 - 30 September, 2017, Saratov, 2018, vol. 10716, p. 1071609, doi: 10.1117/12.2314967

6. Wang R.K., An L. Doppler Optical Micro-Angiography for Volumetric Imaging of Vascular Perfusion in Vivo, *Optics Express*, 2009, vol. 17, issue 11, pp. 8926-8940, doi: 10.1364/OE.17.008926

7. Wang Y., Huang D., Su Y., Yao X.S. Two-Dimensional Phase Unwrapping in Doppler Fourier Domain Optical Coherence Tomography, *Optics Express*, 2015, vol. 24, issue 23, pp. 26129-26145, doi: 10.1364/OE.24.026129

8. Lan G., Singh M., Larin K.V., Twa M.D. Common-Path Phase-Sensitive Optical Coherence Tomography Provides Enhanced Phase Stability and Detection Sensitivity for Dynamic Elastography, *Biomedical Optics Express*, 2017, vol. 8, issue 11, pp. 5253-5266, doi: 10.1364/BOE.8.005253

9. Li X., Yin J., Hu C. [et al.] High-Resolution Coregistered Intravascular Imaging with Integrated Ultrasound and Optical Coherence Tomography Probe, *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 97, issue 13, p. 133702, doi: 10.1063/1.3493659

Identifizierung von Speckle-Strukturen zur Kartierung biologischer Flüssigkeitsströme

Zusammenfassung: Die Farb-Doppler-Kartierungsmethode für ophthalmologische Anwendungen der optischen kohärenten Tomographie (OKT) ist vorgestellt. Die vorgeschlagene Methode ist unter Berücksichtigung von Mustern entwickelt, die Änderungen im Interferenzsignal mit den daraus resultierenden Änderungen in den Eigenschaften des Durchflusses von biologischer Flüssigkeit durch die OKT-Scanebene verbinden. Das Hauptmerkmal des vorgeschlagenen Algorithmus ist die mehrstufige Analyse der Fluktuation der Speckle-Struktur von OKT-Bildern. Speckle-Strukturen werden identifiziert, indem die Funktionen Farbumkehr, Faltung unter Verwendung eines gegebenen Faltungskerns, Schwellenbeschränkungen, morphologische Verarbeitung, konvexe Hüllenbildung, Gradienten-Operationen und Transkodierung der Bilder verwendet werden.

Identification des structures de speckle pour la cartographie des flux de fluides biologiques

Résumé: Est présentée une méthode de cartographie Doppler en couleur pour les applications ophthalmiques de tomographie par cohérence optique (TCO). La méthode proposée est développée en tenant compte des modèles reliant les changements dans le signal d'interférence avec les changements qui les provoquent dans les caractéristiques du flux de fluide biologique à travers le plan de balayage TCO. Une caractéristique clé de l'algorithme proposé est l'analyse en plusieurs étapes des fluctuations de la structure speckle des images TCO. L'identification des structures de speckles est faite par l'utilisation des fonctions d'inversion des couleurs, de convolution à l'aide d'un noyau de convolution donné, de contraintes de seuil, de traitement morphologique, de formation de coques convexes, d'opérations de gradient et de transcodage d'images.

Авторы: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Потлов Антон Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника»; *Фролова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.