

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА

© 2008 г. М. А. Волынский; И. П. Гуров, доктор техн. наук; А. С. Захаров, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: gurov@mail.ifmo.ru

Рассмотрены стохастические модели неоднородных сред и метод нелинейной фильтрации Калмана, обеспечивающий повышенную разрешающую способность при обработке реальных интерференционных сигналов малой когерентности, получаемых в системах оптической когерентной томографии. Предложен метод динамического оценивания положений локальных максимумов огибающей сигнала в процессе сканирования по глубине образца, позволяющий повысить разрешение максимумов частично перекрывающихся пиков по сравнению с классическими критериями. Представлены модельные и экспериментальные результаты, полученные при исследовании тестового образца биоткани.

Коды OCIS: 030.0030, 100.2650, 100.6640, 110.4500, 110.4980, 120.3180.

Поступила в редакцию 18.04.2008.

Введение

Бесконтактные методы анализа внутренней микроструктуры неоднородных сред имеют важное значение для биомедицины, материаловедения, исследований характеристик различных микрообъектов. Неразрушающий контроль случайно-неоднородных сред с повышенной разрешающей способностью обеспечивается при использовании методов оптической когерентной томографии (ОКТ) (см., например, [1–3]).

Корреляционные системы ОКТ основаны на принципе оптического радара с источником излучения малой когерентности [4]. Частично прозрачный исследуемый образец освещается излучением малой когерентности, и отраженные при сканировании по глубине образца волны интерферируют с опорной волной. В результате в пределах длины когерентности излучения формируются интерференционные полосы с огибающей, максимум которой соответствует нулевой разности хода измерительной и опорной волн. Значение огибающей в максимуме характеризует степень отражения от границы слоя среды. При сканировании по глубине многослойной среды формируются пики огибающей интерференционных полос малой когерентности, положение которых соответствует границам слоев.

Известно [4], что разрешающая способность интерферометра малой когерентности в боковом направлении определяется дифракционным пределом, т. е. длиной волны излучения и числовой апертурой объектива. Аксиальное разрешение по глубине среды зависит от длины когерентности излучения и особенностей обработки зарегистрированных интерферометрических сигналов.

Изменения степени отражения по глубине случайно-неоднородной среды носят стохастический характер, интерферометрические сигналы искажаются случайными помехами, поэтому статистический подход к описанию случайно-неоднородных сред и обработке сигналов ОКТ позволяет повысить точность получаемых результатов.

Ввиду высокой разрешающей способности систем ОКТ и необходимости обработки больших объемов информации целесообразно использовать стохастические динамические модели и методы обработки, в частности, метод фильтрации Калмана [5–7]. Метод нелинейной (расширенной) фильтрации Калмана, рассматриваемый в настоящей статье, позволяет повысить помехоустойчивость и разрешающую способность систем ОКТ.

Ниже представлены описание метода, результаты моделирования и экспериментальные результаты, полученные при исследовании тестового образца биоткани.

Теоретические основы метода

Введем координату по глубине z и координату в боковом направлении x в двумерной модели среды. Положение границы i -го слоя среды может быть представлено с помощью стохастического дифференциального уравнения первого порядка (уравнения Ланжевена) в виде

$$\frac{dz_i(x)}{dx} = -\alpha z_i(x) + w_i(x), \quad (1)$$

где параметр α определяет ширину спектра пространственных частот локальных отклонений $z_i(x)$, $w_i(x)$ – формирующий шум с нулевым средним зна-

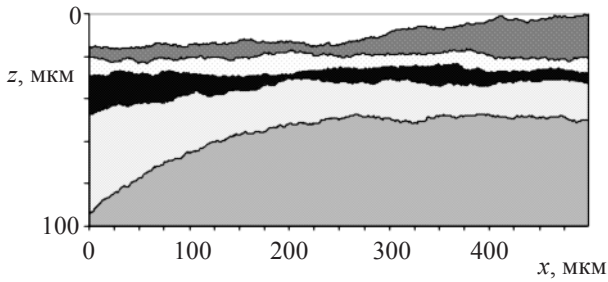


Рис. 1. Пример моделирования многослойной среды с использованием стохастического дифференциального уравнения Ланжевена.

чением $\langle w_i(x) \rangle = 0$, $\langle w_i(x)w_j(x') \rangle = (G_i/2)\delta_{ij}\delta(x-x')$, G_i – спектральная плотность мощности i -го компонента формирующего шума, δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака. В случае $\alpha = \alpha(x, z)$ модель (1) может включать априорно известные свойства исследуемой неоднородной среды.

Решение уравнения (1), как известно, зависит от выбора начальных условий $z_i(0)$. Выбор начальных условий для случая многослойной среды позволяет получить модельное описание, адекватно учитывающее ее микроструктуру.

На рис. 1 показан пример моделирования участка неоднородной среды [7], состоящей из 5 слоев, с использованием модели (1). При исследовании образцов в ОКТ требуется определять степень отражения на границах слоев вдоль координаты z .

Полезную составляющую интерферометрического сигнала малой когерентности в точке с фиксированной боковой координатой x можно представить в виде

$$s(z) = A(z) \cos \Phi(z), \quad (2)$$

где $A(z)$ и $\Phi(z)$ – соответственно огибающая и фаза сигнала. При использовании источника излучения со спектром гауссовой формы огибающая $A(z)$ также является гауссовой. При отражении от границ нескольких слоев происходит наложение огибающих в виде суперпозиции гауссовых кривых, соответствующих каждой границе, при этом

$$A(z) = \sum_i A_i(z) \exp \left[-\frac{(z-z_i)^2}{\sigma^2} \right], \quad (3)$$

где σ – параметр, характеризующий длину когерентности источника излучения; коэффициенты $A_i(z)$ учитывают поглощение света в каждом слое.

Фаза $\Phi(z)$ в (2) может быть представлена в виде

$$\Phi(z) = 2\pi f_0 z + \varphi + \delta\varphi(z), \quad (4)$$

где f_0 – частота интерференционных полос, φ – начальная фаза в точке $z = 0$, $\delta\varphi(z)$ – случайные от-

клонения фазы, обусловленные влиянием внешних дестабилизирующих факторов.

Полезная составляющая сигнала ОКТ (2) искажена влиянием шума наблюдения $n(z)$, а именно

$$s(z) = A(z) \cos \Phi(z) + n(z). \quad (5)$$

Задача состоит в получении оценок значений z_i в (3) в процессе обработки сигнала $s(z)$ с высоким разрешением и устойчивостью к шумам. Решение этой задачи обеспечивается при использовании фильтра Калмана.

Приведем основные соотношения, определяющие алгоритм нелинейной фильтрации Калмана в дискретном времени с векторным представлением сигналов, соответствующим получению данных при сканировании исследуемого образца.

Нелинейный фильтр Калмана учитывает параметры сигнала, включенные в нелинейную векторную параметрическую модель [8]

$$\mathbf{s}(k) = \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}(k)) + \mathbf{n}(k), \quad (6)$$

где $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}(k))$ – нелинейная модель сигнала (функция наблюдения), $\boldsymbol{\theta} = [A_i, z_i, \Phi]^T$ – вектор параметров, $\mathbf{n}(k)$ – векторный шум наблюдения, $k = 1, \dots, K$. Эволюция параметров сигнала на k -м шаге дискретизации Δz определяется уравнением

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}(k-1)) + \mathbf{w}(k), \quad (7)$$

где $\mathbf{w}(k)$ – формирующий шум системы. Векторная функция $\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}(k))$ в выражении (7) учитывает возможное нелинейное изменение вектора параметров.

Динамическая оценка вектора параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ вычисляется как

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \bar{\boldsymbol{\theta}}(k) + \mathbf{P}(k)[\mathbf{s}(k) - \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}}(k))], \quad (8)$$

где $\bar{\boldsymbol{\theta}}(k)$ – вектор параметров, предсказанный для k -го дискретного отсчета на $(k-1)$ -м шаге; $\mathbf{P}(k)$ – коэффициент усиления фильтра Калмана [6], осуществляющий коррекцию предсказанного вектора параметров $\bar{\boldsymbol{\theta}}(k)$ по ошибке прогноза сигнала (невязке).

Используя уравнения (2) и (4), скалярный компонент функции наблюдения в выражении (6) для сигнала с одним максимумом огибающей можно представить в виде

$$h(\boldsymbol{\theta}(k)) = A_1(k) \exp \left[-\frac{(k\Delta z - z_1)^2}{\sigma^2} \right] \cos \Phi(k), \quad (9)$$

где значение z_1 – динамически оцениваемое положение максимума огибающей. При исследовании многослойных сред выражение (9) включает огибающую согласно формуле (3).

Алгоритм нелинейной фильтрации Калмана, описываемый уравнениями (6)–(9), был использо-

ван для получения динамических оценок положения границ слоев исследуемой среды $\hat{z}_i(k)$ одновременно со значениями оценок $\hat{A}_i(k)$.

Исследование разрешающей способности метода

Согласно (3), разрешающая способность метода определяется возможностью различения двух соседних пиков огибающей интерференционных полос малой когерентности при учете влияния также других более отдаленных пиков. В случае включения в модель m пиков требуется обеспечить фильтрацию одновременно $3m$ параметров (включая фазу полос), что технически сложно для вычислений в реальном времени. Поэтому целесообразно использовать последовательную фильтрацию пиков огибающей.

Для учета влияния близко расположенных соседних пиков после выделения одного пика следует учитывать его при фильтрации параметров следующего пика

$$\hat{A}_2(k) = A(k) - \hat{A}_1(k) \exp\left[-\frac{(k\Delta z - \hat{z}_1)^2}{\sigma^2}\right]. \quad (10)$$

При этом алгоритм позволяет выполнить фильтрацию параметров пиков огибающей при априорно неизвестном числе слоев.

Для исследования характеристик рассмотренного алгоритма использовались модельные сигналы интерференционных полос малой когерентности при среднем значении длины волны 820 нм, ширине спектра около 50 нм и длине когерентности 6 мкм. Указанные значения являются типичными для источников излучения (суперлюминесцентных диодов), используемых в современных системах ОКТ (см., например, [1–3]). Сигналы полос искажались случайными отклонениями фазы $\delta\varphi(z)$ в интервале $[-2\pi/10, 2\pi/10]$ и аддитивным шумом наблюдения с относительным средним квадратическим отклонением 5%.

Результат нелинейной фильтрации координат максимумов двух соседних пиков огибающей представлен на рис. 2.

Истинные значения координат максимумов составляли 57 и 61 мкм, т. е. расстояние между пиками не превышает примерно 70% длины когерентности излучения, поэтому пики не разрешаются при использовании классических критериев.

Из рис. 2 видно, что при использовании предлагаемого метода правильная оценка координаты первого пика формируется начиная с точки примерно 51 мкм, т. е. с заметным упреждением до фактического достижения максимума с координатой 57 мкм.

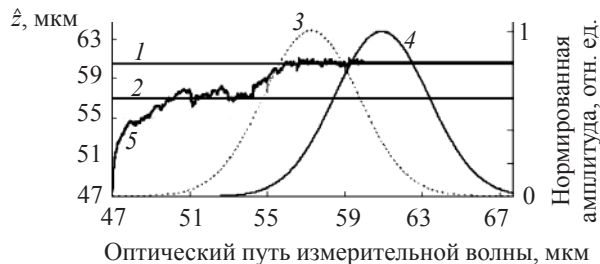


Рис. 2. Гауссовы огибающие интерференционного сигнала и динамическая оценка положений их максимумов, полученная с использованием нелинейного фильтра Калмана. 1 и 2 — истинные положения максимумов огибающей (\hat{z}), 3 и 4 — огибающая интерференционного сигнала, соответствующие 1-му и 2-му максимумам, 5 — оценка положений максимумов огибающей интерференционного сигнала (\hat{z}).

Это позволяет учесть уже найденный пик и использовать преобразование (10) для фильтрации положения максимума следующего пика огибающей. Координата второго максимума оценивается также с упреждением, начиная с точки 56 мкм. Отметим, что переходный интервал между оценками первого и второго пиков не превышает половины длины когерентности излучения.

Таким образом, показано, что предложенный метод нелинейной фильтрации обеспечивает получение динамических оценок координат соседних максимумов огибающей с разрешающей способностью более высокой, чем длина когерентности излучения.

В общем случае предложенный алгоритм может быть расширен. После идентификации m -го пика следующий $(m + 1)$ -й пик оценивается с учетом параметров всех предыдущих пиков, а именно

$$\hat{A}_{m+1}(k) = A(k) - \sum_{i=0}^m \hat{A}_i(k) \exp\left[-\frac{(k\Delta z - \hat{z}_i)^2}{\sigma^2}\right]. \quad (11)$$

Подчеркнем, что предложенный метод не требует априорной информации об общем числе слоев в исследуемом образце благодаря последовательному оцениванию максимумов огибающей от слоя к слою.

Разрешающая способность метода ограничивается погрешностью идентификации интервалов, внутри которых допустимо считать получаемые оценки соответствующими максимуму огибающей.

Рассмотрим интервал $q = p - 1$, содержащий точки $[z_l, z_{l+1}, \dots, z_{p-1}, z_p]$. Необходимо ввести правила идентификации интервала, например, принять ми-

нимально допустимое значение длины интервала и ограничение на размах значений внутри интервала

$$\Delta\bar{z} = \max_{j \in [l, p]} \{z_j\} - \min_{j \in [l, p]} \{z_j\}. \quad (12)$$

Если $\Delta\bar{z} < \Delta\bar{z}_{\max}$, то интервал соответствует максимуму $z_i = \langle z \rangle$, где

$$\langle z \rangle = \frac{1}{p-l} \sum_{j=l}^p z_j. \quad (13)$$

В качестве альтернативы (12) можно учитывать дисперсию оценки

$$\hat{\sigma}_{z_i}^2 = \frac{1}{p-l-1} \sum_{j=l}^p (z_j - \langle z \rangle)^2 \quad (14)$$

и использовать критерий $\hat{\sigma}_{z_i}^2 < \sigma_{\max}^2$. Однако критерий (12) является более предпочтительным, поскольку не требует пересчета величины $\langle z \rangle$ на каждом шаге и обладает большей вычислительной эффективностью.

Некорректное задание критериев идентификации пика может повлечь два типа ошибок. Ошибки первого типа состоят в обнаружении несуществующих максимумов. Эти ошибки возникают при малой длине интервала q и большом допуске размахе значений (12). Ошибки второго типа состоят в пропуске максимума при слишком большой длине интервала q и/или слишком строгом ограничении на отклонения значений внутри интервала. Детальный анализ ошибок первого и второго типов приведен в [7].

Исследование тестового образца биоткани

Полученные результаты моделирования использованы при исследовании тестового образца биоткани с помощью высокоразрешающей широкопольной системы ОКТ [9], в основе которой лежит оптическая схема микроинтерферометра Линника. Интерферометр освещается галогенной лампой с длиной когерентности излучения около 2 мкм. Экспериментальная установка оснащена автоматизированным микроприводом для аксиального сканирования образца и видеокамерой, регистрирующей последовательность видеокадров.

В качестве исследуемого образца выбрано крыло комара, поскольку биоткань данного вида имеет малую толщину, выраженные границы и является частично прозрачной. Размер исследуемого участка образца составлял 200×160 мкм.

На рис. 3 показаны микрофотография исследуемого участка и карта высот рельефа поверхности, восстановленная при использовании системы в режиме малокогерентного рефлектометра. Рисунок 3б демонстрирует высокую информативность отображения трехмерных данных об объекте.

На рис. 4а представлены экспериментальные данные, соответствующие сигналам одной строки видеокамеры в последовательности видеокадров, которая записана при сканировании по глубине образца. Диапазон сканирования по глубине составлял 32 мкм.

На рис. 4б показан интерференционный сигнал малой когерентности без фоновой составляющей, соответствующий A -скану, отмеченному вертикаль-

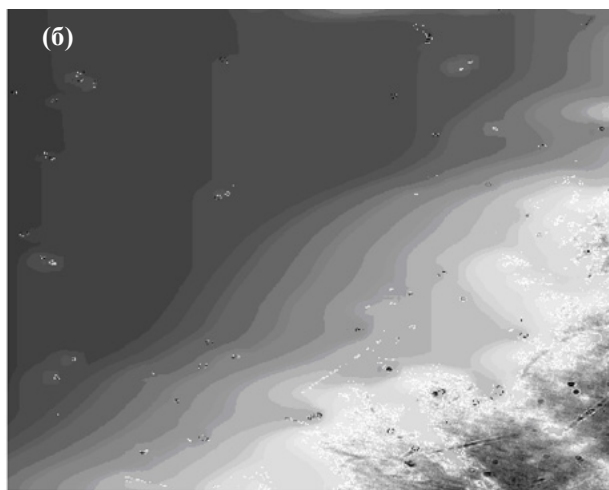
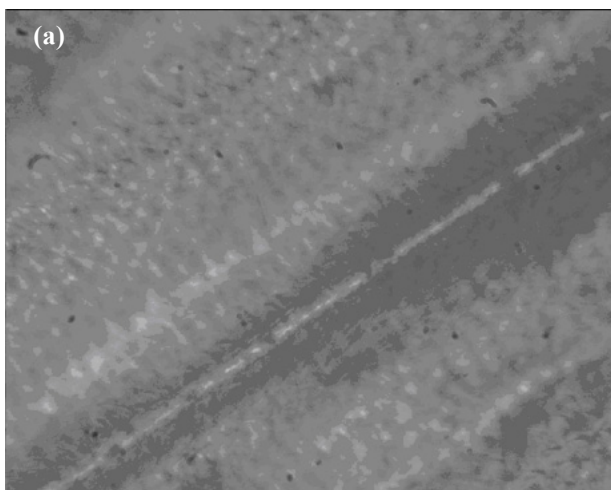


Рис. 3. Микрофотография участка поверхности исследуемого образца (а) и восстановленная карта микрорельефа участка в оттенках серого (б).

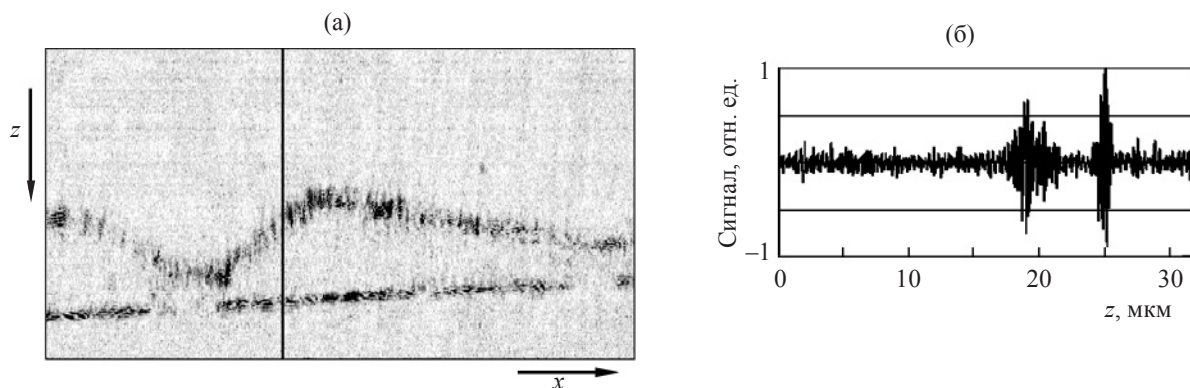


Рис. 4. Сигнал в сечении образца до обработки (а) и пример интерференционного сигнала (б).

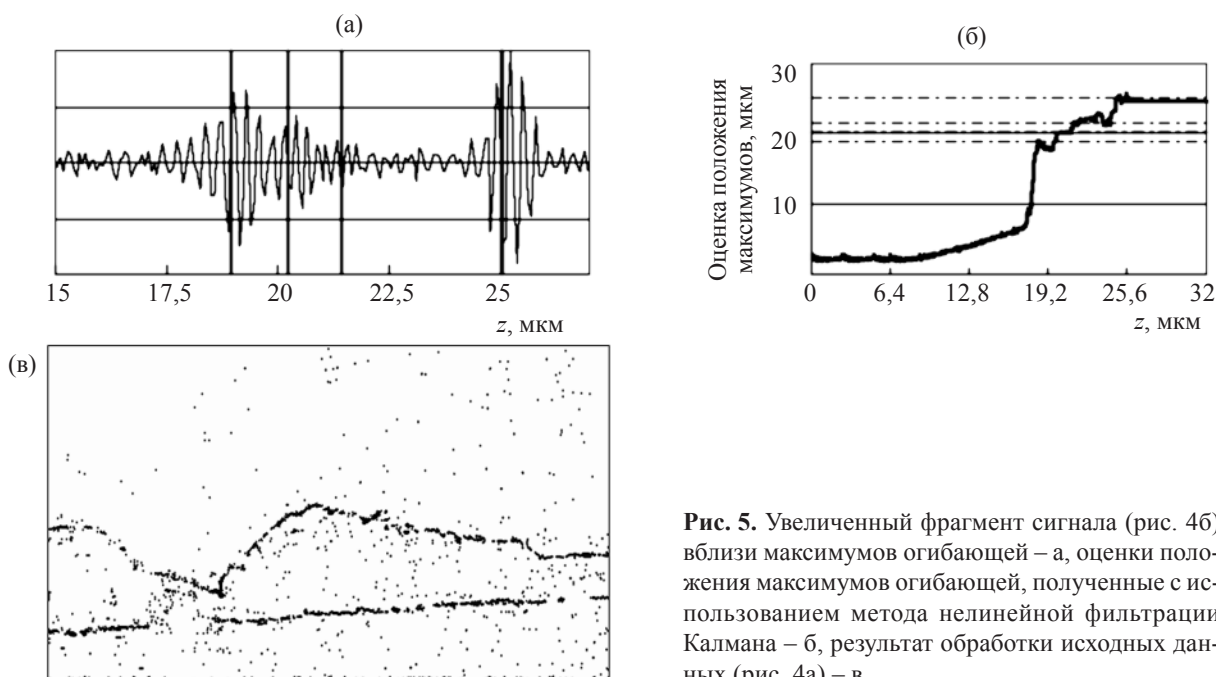


Рис. 5. Увеличенный фрагмент сигнала (рис. 4б) вблизи максимумов огибающей – а, оценки положения максимумов огибающей, полученные с использованием метода нелинейной фильтрации Калмана – б, результат обработки исходных данных (рис. 4а) – в.

ной чертой на рис. 4а. Сигнал содержит два пика, формируемых при отражении от границ образца.

На рис. 4б видно, что левый пик содержит несколько наложенных друг на друга огибающих, что свидетельствует о наличии подслоев биоткани, из которых состоит верхний слой. Для восстановления тонкой структуры левого пика необходимо обеспечить повышенную разрешающую способность при обработке сигналов.

Фрагмент полезной составляющей интерференционного сигнала вблизи максимумов огибающей и результат динамического оценивания положения максимумов с помощью рассмотренного выше алгоритма нелинейной фильтрации Калмана представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что рассматрива-

емый метод обеспечивает высокую разрешающую способность (примерно 1 мкм).

Совместное использование информации о положении максимумов огибающей и ее значений в максимумах позволяет выделить наиболее выраженные пики огибающей в *A*-сканах и получить более четкое представление границ исследуемого объекта, как это показано на рис. 5в.

Сравнение с исходными данными (см. рис. 4а) демонстрирует значительное повышение четкости отображения границ образца. Однако повышение разрешающей способности сопровождается некоторым возрастанием шума. Влияние шума можно уменьшить при использовании дополнительных методов вторичной обработки полученной томограммы.

Заключение

Рассмотренный метод, основанный на использовании статистического подхода и формализма стохастических дифференциальных уравнений, учитывающих свойства исследуемых случайных процессов и априорные знания об исследуемой среде и ее математической модели в явной форме, стохастических моделей неоднородных сред и нелинейной фильтрации Калмана, обеспечивает повышенную разрешающую способность при обработке реальных интерференционных сигналов малой когерентности, получаемых на выходе системы ОКТ.

Предложенный вариант метода на основе переключаемой модели (10) позволяет проводить динамическое оценивание положений локальных максимумов огибающей сигнала по мере их регистрации в процессе сканирования по глубине образца и повысить разрешение положения максимумов частично перекрывающихся пиков по сравнению с классическими критериями разрешения. Поэтому рассмотренный метод может быть классифицирован как один из нелинейных методов сверхразрешения с регуляризацией, которая обеспечивается выбором порогового критерия для параметров (12) или (14).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый метод позволяет значительно улучшить четкость отображения слоистой микроструктуры биотканей в системах ОКТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fercher A.F., Drexler W., Hitzenberger C.K., Lasser T.* Optical coherence tomography – principles and applications // *Rep. Prog. Phys.* 2003. V. 66. P. 239–303.
2. *Tomlins P.H., Wang R.K.* Theory, developments and applications of optical coherence tomography // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. P. 2519–2535.
3. *Гуров И.П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики* / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6–30.
4. *Dresel T., Hausler G., Ventzke H.* Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 919–925.
5. *Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // *Trans. ASME.* 1960. V. 82. P. 35–45.
6. *Gurov I., Ermolaeva E., Zakharov A.* Analysis of low-coherence interference fringes by the Kalman filtering method // *JOSA A.* 2004. V. 21. P. 242–251.
7. *Gurov I., Volynsky M., Zakharov A.* Evaluation of multilayer tissue in optical coherence tomography by the extended Kalman filtering method // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6734. 67341P.
8. *Alarousu E., Gurov I., Hast J., Myllyla R., Zakharov A.* Optical coherence tomography of multilayer tissue based on the dynamical stochastic fringe processing // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5149. P. 13–20.
9. *Gurov I., Karpets A., Margariants N., Vorobeva E.* Full-field high-speed optical coherence tomography system for evaluating multilayer and random tissues // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6618. 661807P.