

РЕКУРРЕНТНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2012 г. М. А. Волынский; И. П. Гуков, доктор техн. наук; Е. В. Жукова, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: maxim.volynsky@gmail.com

Рассмотрены особенности формирования сигналов в системах оптической когерентной томографии и рекуррентные алгоритмы динамической обработки интерферометрических сигналов малой когерентности. Приведены оценки точности и быстродействия алгоритмов расширенной фильтрации Калмана и нелинейной марковской фильтрации применительно к анализу сигналов в широкополосной оптической когерентной томографии.

Ключевые слова: интерферометрия малой когерентности, оптическая когерентная томография, видеоинформация, рекуррентные алгоритмы обработки сигналов.

Коды OCIS: 100.3175, 110.4500

Поступила в редакцию 29.05.2012

Введение

Методы оптической когерентной томографии (ОКТ) в настоящее время широко используются для контроля внутренней микроструктуры частично прозрачных материалов, слоистых и случайно-неоднородных сред [1, 2]. Методы ОКТ основаны на принципах интерферометрии малой когерентности применительно к рассеивающим неоднородным средам и обеспечивают разрешение до долей микрометра при восстановлении томографических изображений, представляющих трехмерную внутреннюю микроструктуру неоднородных сред на глубину проникновения оптического излучения. Методы ОКТ находят применение в различных областях биомедицины и материаловедения. В публикациях [1–3] содержится подробное описание основных принципов ОКТ и результатов, полученных в последние годы.

Ввиду высокой разрешающей способности в системах ОКТ требуется обрабатывать значительные объемы информации, характеризующей исследуемые объекты. С позиций теории информации исследуемый объект можно интерпретировать как источник сообщений, поступающих последовательно в оптический и электронный каналы передачи информации [4]. Под сообщениями здесь понимается локальное

значение коэффициента отражения от отдельного "элемента объема" (вокселя) исследуемой среды.

Вероятность получения значения коэффициента отражения r_q в точке z_k определяется как

$$P(r_q, z_k) = P(r_q)P(z_k)$$

ввиду статистической независимости значения коэффициента отражения и выбора координаты точки. При этом энтропия источника сообщений составляет

$$\begin{aligned} H(r, z) &= H(r) + H(z) = \\ &= -\sum_{q=1}^{m_r} P(r_q) \log_2 P(r_q) - \sum_{k=1}^{m_z} P(z_k) \log_2 P(z_k). \end{aligned}$$

При представлении коэффициента отражения, например, 256-ю значениями m_r и погрешности определения координаты 4 мкм при глубине среды 1 мм (m_z возможных значений координаты) энтропия источника сообщений составит около 2 байт/воксель. Эта информация должна быть передана через оптический и электронный каналы ОКТ-системы с максимальным быстродействием.

Наиболее высокая разрешающая способность как по глубине исследуемой среды, так и в боковом направлении достигается в корреляционных системах широкополосной ОКТ [5, 6],

основанных на использовании двухлучевого интерферометра с источником излучения малой когерентности и изменяемой оптической длиной пути в опорном плече. Это позволяет селективировать слои среды по значениям огибающей сигнала каждого пиксела в последовательности зарегистрированных видеокадров. В целях повышения быстродействия целесообразно использовать методы и алгоритмы динамической обработки видеоинформации в последовательности видеокадров [7].

В статье рассмотрены особенности рекуррентных алгоритмов применительно к обработке сигналов в интерферометрах малой когерентности, представлены оценки точности и быстродействия алгоритмов динамической обработки видеоинформации в широкопольных системах ОКТ.

Формирование видеоинформации в широкопольных системах ОКТ

Принцип построения систем ОКТ основан на формировании измерительной волны E_1 , взаимодействующей с исследуемым объектом, и опорной волны E_2 при последующем сложении и квадратичном детектировании суммы двух волн $E = E_1 + E_2$ (рис. 1).

На рис. 2 представлена упрощенная схема корреляционного интерферометра. В корреляционном интерферометре осуществляют перемещение оптической системы относительно исследуемого объекта. При этом интерференционные полосы малой когерентности формируются в пределах длины когерентности излучения при интерференции части измерительной волны, отраженной от частично прозрачного неоднородного объекта и находящихся от светоделителя на расстоянии, равном оптической длине пути опорной волны.

Обозначим значения напряженности электрического поля измерительной и опорной волн в интерферометре как



Рис. 1. Принципиальная схема системы корреляционной ОКТ.

$$E_1(v, t) = \kappa E_0(v, t)H(v), \quad (1)$$

$$E_2(v, t, \tau) = (1 - \kappa)E_0(v, t)\exp(-j2\pi v\tau), \quad (2)$$

где v – частота оптических колебаний, κ – амплитудный коэффициент отражения в светоделителе, $E_0(v, t) = A(v)\exp(-j2\pi vt)$ – оптические колебания источника излучения с амплитудным спектром $A(v)$, $H(v)$ – комплексная частотная характеристика исследуемого образца, $\tau = \Delta/c$ – интервал времени сдвига измерительной волны по отношению к опорной при оптической разности хода $\Delta = 2z$, c – скорость света.

Интенсивность излучения, регистрируемого на выходе интерферометра, определяется выражением

$$I(v, \tau) = \langle (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \rangle = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2\text{Re}\langle E_1 E_2^* \rangle, \quad (3)$$

где угловые скобки обозначают усреднение во времени. Принимая интервал усреднения много большим периода световых колебаний и $\kappa = 0,5$, из (1)–(3) получим

$$I(v, \tau) = \frac{1}{4}G(v)|H(v)|^2 + \frac{1}{4}G(v) + \frac{1}{2}G(v)\text{Re}\{H(v)\exp(-j2\pi v\tau)\}, \quad (4)$$

где $G(v)$ – спектральная плотность мощности источника излучения. Первое слагаемое в (4) представляет эффект фильтрации спектральной плотности мощности исходного излучения

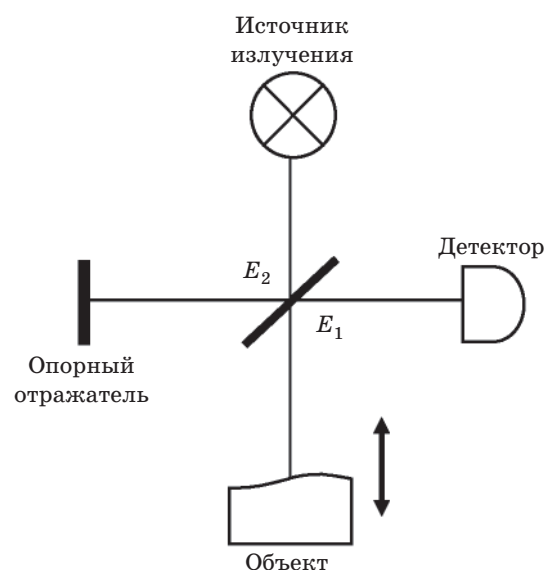


Рис. 2. Функциональная схема корреляционного интерферометра.

при взаимодействии с исследуемым образцом. Второе слагаемое соответствует излучению, отраженному в опорной ветви интерферометра. Третье слагаемое содержит полезную информацию об исследуемом образце.

В корреляционном интерферометре все спектральные составляющие в (4) некогерентно суммируются и результирующая интенсивность зависит только от времени задержки τ , а именно

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(v, \tau) dv = \frac{1}{4} I_0 [1 + 2\text{Re}V(\tau)], \quad (5)$$

где

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} G(v) [1 + |H(v)|^2] dv, \quad (6)$$

$$V(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(v) H(v) \exp(-j2\pi v\tau) dv. \quad (7)$$

Выражение (7) является преобразованием Фурье от произведения двух функций. В соответствии с теоремой о свертке с учетом взаимосвязи спектральной плотности мощности и корреляционной функции стационарных эргодических случайных процессов (теоремы Винера-Хинчина), это выражение можно представить в области независимой переменной в форме интеграла свертки

$$V(t) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (8)$$

где $R(\tau)$ – автокорреляционная функция излучения источника. Выражение

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(v) \exp(j2\pi vt) dv \quad (9)$$

можно интерпретировать как импульсный отклик исследуемого образца при освещении излучением в виде δ -импульса.

Из (8) следует, что при использовании излучения с широким спектром (подобного некогерентированному шуму) и узкой автокорреляционной функцией $R(\tau)$, функция видности интерференционных полос $V(t)$ характеризует отклик исследуемого образца $V(t) \approx h(t)$, а значит, и его внутреннюю структуру, с высокой разрешающей способностью.

В системах широкополной ОКТ сигналы вида (5) регистрируются при помощи видеокамеры с дискретными координатами пикселей (i, j) в форме последовательности видеокадров,

соответствующих дискретным значениям координаты z_k по глубине исследуемого образца. При этом требуется регистрировать видеоинформацию в виде трехмерного набора значений $I(i, j, k)$, в результате обработки которого определяется видность интерференционных полос $V(i, j, k)$, характеризующая трехмерную внутреннюю микроструктуру исследуемого объекта.

Рекуррентные алгоритмы обработки видеоинформации в системах ОКТ

При трехмерном дискретном представлении значения интенсивности $I(i, j, k)$ с учетом (5), (6) и (7) с точностью до постоянного множителя характеризуются значениями интерферометрического сигнала

$$s(i, j, k) = B(i, j) + A(i, j, k) \cos \Phi(i, j, k), \quad (10)$$

где $B(i, j)$ соответствует фоновой составляющей интенсивности $I_0(i, j)$, $A(i, j, k)$ характеризует значения видности $|V(i, j, k)|$ и представляет собой огибающую полезной составляющей сигнала (10), $\Phi(i, j, k)$ – значения фазы интерференционных полос малой когерентности.

Параметры сигнала (10) можно представить в виде вектора $\theta = (B, A, \Phi)^T$ и рассматривать эволюцию его параметров по последовательности видеокадров. Обозначив для краткости записи набор сигналов (10) для всех пикселей видеокамеры (i, j) в форме векторного сигнала $s(k) = \{s(i, j, k)\}$ и правую часть выражения (10) в форме векторной функции наблюдения $h(k, \theta)$, интерферометрическую систему можно охарактеризовать системой уравнений

$$s(k) = h(k, \theta(k)) + n(k), \quad (11)$$

$$\theta(k) = T(k)\theta(k-1) + w(k), \quad (12)$$

в которой первое уравнение согласно теории динамических систем носит название уравнения наблюдения, второе уравнение представляет собой уравнение состояния системы [8]. Уравнение наблюдения (11) включает шум наблюдения $n(k)$, который будем полагать не зависящим от параметров системы, тогда как в уравнении системы (12) шум системы $w(k)$ учитывает случайные отклонения параметров. Уравнение (12) включает эволюцию вектора параметров, определяемую матрицей перехода $T(k)$, которая учитывает априорно предполагаемое изменение вектора параметров от предыдущего видеокадра $(k-1)$ к последующему (k) .

К примеру, если шаг дискретизации по координате z настолько мал, что параметры сигнала (10) между шагами $k - 1$ и k могут считаться постоянными (параметры полагают взаимно не коррелированными), тогда матрица перехода представляет собой диагональную матрицу с единичными диагональными элементами.

Учитывая уравнение (12), можно осуществить предсказание вектора параметров для k -го видеокадра

$$\bar{\theta}(k) = \theta(k/k - 1) = \mathbf{T}(k)\hat{\theta}(k - 1), \quad (13)$$

где $\hat{\theta}(k - 1)$ – оценка вектора параметров для предыдущего видеокадра. Оценку вектора параметров на текущем шаге k можно получить в форме

$$\hat{\theta}(k) = \bar{\theta}(k) + \mathbf{P}(k)[\hat{s}(k) - \mathbf{h}(k, \bar{\theta}(k))], \quad (14)$$

где $\hat{s}(k)$ – оценка значений сигнала в наблюдаемом видеокадре, $\mathbf{P}(k)$ – матрица функций преобразования ошибки предсказания сигнала в поправку предсказанного вектора параметров.

Ввиду нелинейности функции $\mathbf{h}(k, \bar{\theta}(k))$, на основании значений которой осуществляется предсказание величины интерферометрического сигнала, используются различные алгоритмы предсказания для последующего видеокадра.

Алгоритм расширенной фильтрации Калмана

Предсказание значений сигнала для последующего видеокадра возможно осуществить при локальной линеаризации функции наблюдения полагая, что

$$\mathbf{h}(k, \bar{\theta}(k)) \approx \mathbf{H}_1(k)\bar{\theta}(k), \quad (15)$$

где $\mathbf{H}_1(k) = \mathbf{h}'_{\theta}(k, \bar{\theta}(k))$ – матрица первых производных функции наблюдения по параметрам. При определении матрицы преобразования $\mathbf{P}(k)$ в (14) через матрицы отношений дисперсии шума системы к дисперсии шума наблюдения [7] алгоритм (14) с учетом (15) представляет собой алгоритм расширенной фильтрации Калмана, успешно используемый для обработки интерферометрических сигналов в микропрофилометрии [9], ОКТ [10], при анализе двумерных картин интерференционных полос [11] и в интерферометрии управляемого фазового сдвига с развертыванием фазы волнового фронта [12].

Алгоритм расширенной фильтрации Калмана является квазиоптимальным ввиду ис-

пользования линеаризации функции наблюдения (15). В связи с этим, алгоритм требует тщательного определения начальных условий на первом шаге обработки, точной настройки и опыта в практическом использовании. Основная сложность состоит в нелинейном преобразовании ошибок предсказания, предполагаемых относящимися к гауссовскому закону распределения вероятностей. Нелинейное преобразование может приводить к значительным отклонениям от истинной модели интерференционных полос и нестабильности фильтрации в случаях больших погрешностей линеаризации модели с использованием производных первого порядка. Для преодоления указанной проблемы целесообразно использовать более точное правило предсказания.

Алгоритм нелинейной марковской фильтрации

Известно, что любой случайный процесс можно аппроксимировать марковским процессом с заданной степенью точности [13, 14]. На этой основе разработана марковская теория оптимальной нелинейной фильтрации [14]. В работе [15] представлены результаты применения метода марковской нелинейной фильтрации для обработки интерферометрических сигналов.

В данном алгоритме предсказание значения сигнала осуществляется с использованием линеаризации модели сигнала при ее разложении в ряд Тейлора до второй производной включительно

$$\mathbf{h}(k, \bar{\theta}(k)) \approx [\mathbf{H}_1(k) + \mathbf{H}_2(k)]\bar{\theta}(k) + \mathbf{G}(k), \quad (16)$$

где $\mathbf{H}_2(k) = \mathbf{h}''_{\theta}(k, \bar{\theta}(k))$ – матрица, включающая вторые производные функции наблюдения по параметрам, $\mathbf{G}(k)$ – корректирующее слагаемое, определяемое гауссовской аппроксимацией второго порядка функции плотности вероятности ошибки предсказания [14].

Как показали исследования, основное преимущество метода нелинейной марковской фильтрации состоит в адекватности представления интерферометрических сигналов, описываемых нелинейным уравнением наблюдения со случайными отклонениями параметров, что обеспечивает стабильность вычислений. Кроме этого, использование производных до второго порядка позволяет корректно определять знак частоты интерференционных полос (т. е. возрастание или убывание фазы), что весьма

важно при решении задач развертывания фазы [12]. Детальное описание алгоритма приведено в работе [15].

Экспериментальные исследования

При практическом использовании методов ОКТ измерения осуществляют с использованием автоматической измерительной системы, которая включает двухлучевой микроинтерферометр, сочетающий возможности классического интерферометра и микроскопа с увеличением до $500\times$. При сканировании образца в автоматическом режиме регистрируется информация о степени отражения излучения от слоев внутренней микроструктуры исследуемого образца, осуществляется обработка информации с использованием рассмотренных выше вычислительных алгоритмов для получения количественных данных о свойствах объекта и их 3D-визуализации.

На рис. 3а приведена схема системы корреляционной ОКТ на основе автоматизированного микроинтерферометра Линника. При помощи осветителя 2, состоящего из конденсора, апертурной и полевой диафрагм, а также объектива, от источника 1 формируется параллельный пучок света, который падает на светоделительную пластину 4. Принцип работы прибора основан на интерференции двух частично когерентных волн, одна из которых служит опорной. В опорном плече интерферометра излучение распространяется через компенсатор 5 и фокусируется микрообъективом 6 на опорном зеркале 7, при отражении от которого излучение возвращается к светоделительной пластинке 4. В направлении микрообъектива 8 распространяется предметная волна, которая фокусируется на исследуемом образце 10, расположенном на поверхности рабочего столика 9 микроинтерферометра.

Интерферометрические сигналы регистрируются при помощи видеокамеры 12 в форме последовательности видеок кадров, характеризующих отдельные слои по глубине исследуемого образца, при этом объектив 11 обеспечивает требуемый масштаб исследуемого участка в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры. Последовательность видеок кадров с выхода видеокамеры направляется в компьютер, который управляет работой механизма сканирования 15 при помощи блока управления 14 синхронно с записью и обработкой видеок кадров.

Внешний вид используемой в работе системы корреляционной ОКТ показан на рис. 3б.

На рис. 3в приведена последовательность регистрируемых видеок кадров, а на рис. 3г – интерферометрический сигнал, представляющий собой эволюцию значений сигнала в отдельном пикселе в латеральной плоскости по глубине среды (по номеру видеок кадра). Задача обработки данных в системе корреляционной ОКТ сводится к задаче динамического оценивания параметров подобных сигналов для каждого пикселя, регистрируемых в текущий момент времени.

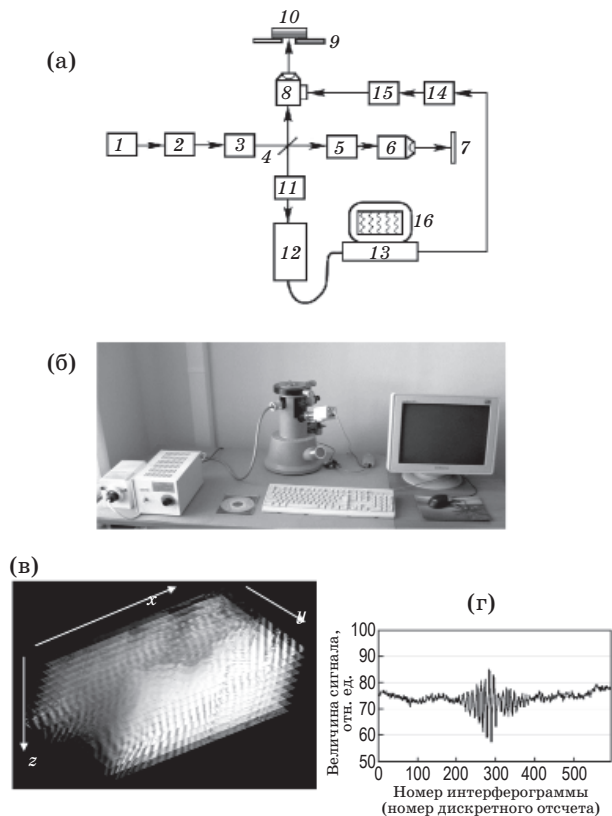


Рис. 3. Принципиальная схема системы корреляционной ОКТ на основе автоматизированного микроинтерферометра Линника (а). 1 – источник излучения, 2 – осветительная система, 3 – блок светофильтров, 4 – светоделительная пластинка, 5 – компенсатор, 6 – микрообъектив, 7 – опорное зеркало, 8 – микрообъектив, 9 – предметный столик, 10 – образец, 11 – объектив, 12 – видеокамера, 13 – процессор, 14 – блок управления сканированием, 15 – блок сканирования, 16 – монитор; внешний вид системы корреляционной ОКТ (б); последовательность получаемых в процессе измерения видеок кадров (в); пример эволюции интенсивности одного пикселя в 8-разрядном представлении (г).

Методом корреляционной ОКТ были выполнены исследования различных объектов. В качестве примера на рис. 4 показаны 3D изображения крыла комара-пискуна или комара обыкновенного (*Culex pipiens*). Из реконструированного 3D изображения были выделены отдельные слои в изображении, на которых можно рассмотреть микроструктуру исследуемой области. На рис. 4а–г приведены результаты послойного изучения строения крыла комара. Рисунки демонстрируют возможности методов для изучения строения биотканей, возможности реконструирования 3D изображений изучаемых объектов и методов визуализации отдельных сегментов и слоев.

При проведении исследований ставилась также задача сравнения точности и быстродей-

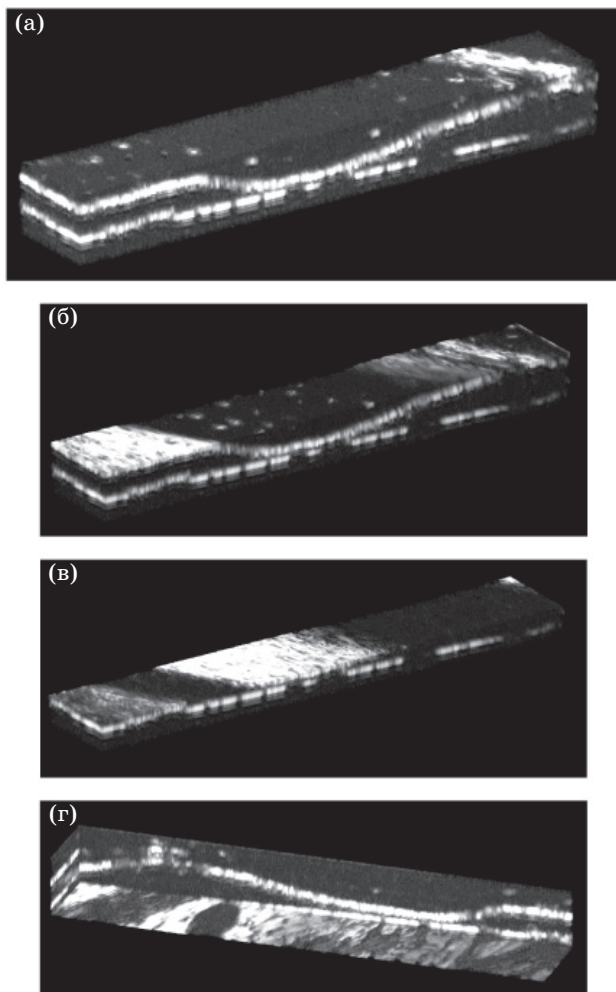


Рис. 4. Реконструированное 3D изображение крыла комара обыкновенного (*Culex pipiens*) (а), выделенные сегменты в 3D изображении крыла комара (б, в) и строение тканей с нижней стороны крыла (г). Размер скана 200×60 мкм, глубина сканирования 32 мкм.

ствия алгоритмов расширенной фильтрации Калмана и нелинейной марковской фильтрации применительно к динамической обработке интерферометрических сигналов малой когерентности в системах ОКТ.

Исследования проводили на модельных интерферометрических сигналах с огибающей гауссовской формы. На рис. 5а представлен пример сигнала для случая отношения сигнал-шум, равного 5. Последовательность значений сигнала включала 512 отсчетов и обрабатывалась с использованием каждого из двух алгоритмов, примененных к одной и той же

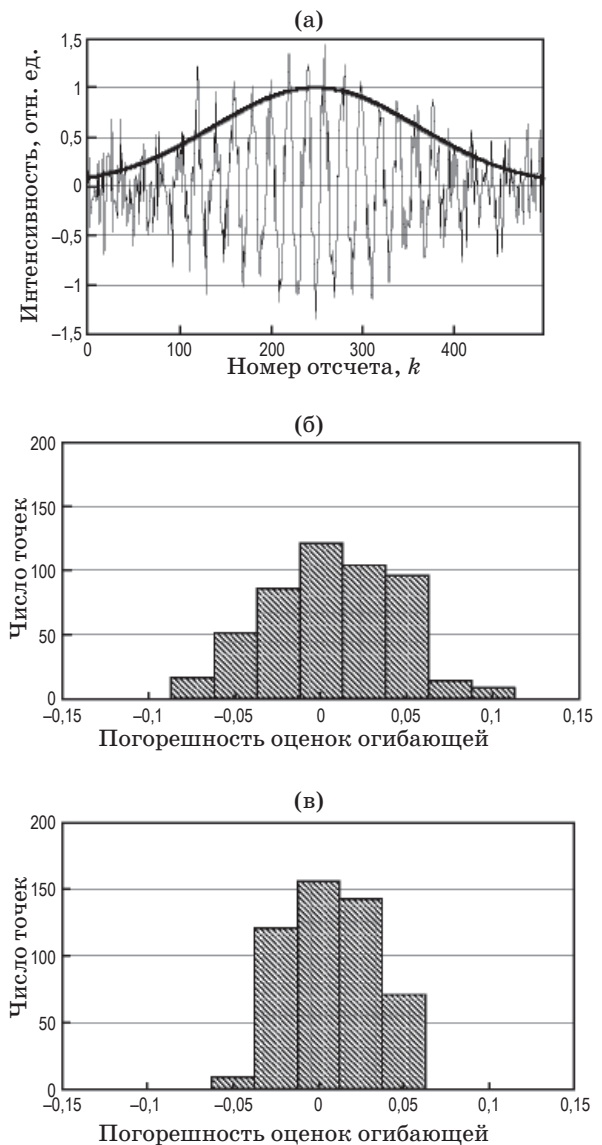


Рис. 5. Исходный интерферометрический сигнал с гауссовой огибающей (а) и гистограммы ошибок оценки огибающей методами оптимальной нелинейной марковской фильтрации (б) и расширенной фильтрации Калмана (в).

реализации сигнала. Полученные гистограммы оценок погрешностей обработки приведены на рис. 5б, в.

Из рисунков видно, что гистограмма погрешностей для алгоритма расширенной фильтрации Калмана (рис. 5б) более широкая по сравнению с гистограммой погрешностей алгоритма нелинейной марковской фильтрации. Это означает более высокую точность обработки при использовании второго алгоритма. Количественные оценки среднего квадратического отклонения (СКО) составили 5% и 3%, соответственно, для алгоритма расширенной фильтрации Калмана и нелинейной марковской фильтрации.

В работе [7] выполнена оценка количества элементарных вычислительных операций и усредненного времени их выполнения при использовании каждого из алгоритмов, чтобы сравнить быстродействие алгоритмов. Вычисления проводили для скалярных фильтров с использованием для их реализации языка программирования C++ (Microsoft Visual Studio 2008, release) без специальной оптимизации (с одинаковым уровнем стандартной оптимизации для каждого фильтра). Для обработки использовался компьютер Intel Core 2 Quad Q9300 2,5 ГГц. Полученные результаты представлены в таблице, из которой следует, что алгоритм расширенной фильтрации Калмана имеет более высокое быстродействие, однако, как отмечено выше, характеризуется меньшей точностью. Наиболее трудоемкими в вычислительном отношении являются операции

умножения матриц, заметно ограничивающие быстродействие нелинейного марковского фильтра.

Экспериментальные исследования показали, что несмотря на более высокую вычислительную сложность алгоритм нелинейной марковской фильтрации можно рассматривать как более предпочтительный с точки зрения точности и устойчивости при динамической обработке интерферометрических сигналов в ОКТ. Использование современных высокопроизводительных вычислительных средств обработки видеoinформации на видеокартах (Graphics Processing Units, GPU), оптимизированных для векторно-матричных вычислений, позволит дополнительно повысить быстродействие рекуррентных алгоритмов, обеспечивающих требуемую точность обработки сигналов в ОКТ.

Заключение

Динамическая обработка видеoinформации в системах ОКТ с использованием рекуррентных алгоритмов основывается на параметрической модели векторного интерферометрического сигнала и априорная информация о неопределенности параметров должна быть учтена в алгоритме фильтрации до начала вычислений. Это означает, что параметрические методы и алгоритмы являются специализированными применительно к решаемой задаче и поэтому во многих случаях обеспечивают преимущество в точности, помехоустойчивости и быстродействии.

Экспериментальные оценки быстродействия алгоритмов

Вид операнда	Операция	Время выполнения операции	Расширенная фильтрация Калмана		Марковская фильтрация	
			Количество операций на шаге фильтрации	Время выполнения шага фильтрации, мс	Количество операций на шаге фильтрации	Время выполнения шага фильтрации, мс
Матрица	Транспонирование	0,40 мс	3	1,2	3	1,2
	Умножение	0,76 мс	1	0,8	3	2,3
	Сложение/вычитание	0,49 мс	2	1,0	2	1,0
Скаляр	Сложение/вычитание/умножение/деление	0,7 мкс	5	0	16	0,01
	Синус/косинус	0,8 мкс	3	0	12	0,01
Общее время шага фильтрации, мс			3,0		4,5	

В статье представлены экспериментальные результаты реконструкции 3D изображений внутренней микроструктуры объектов, рассмотрены особенности и характеристики двух рекуррентных алгоритмов применительно к обработке интерферометрических сигналов со случайно изменяющимися параметрами в ОКТ-системах.

Метод расширенной фильтрации Калмана является квазиоптимальным, поскольку основан на линеаризации первого порядка модели интерферометрического сигнала и требует специальной настройки при практическом использовании для обеспечения требуемой точно-

сти и устойчивости функционирования. Метод марковской фильтрации обеспечивает оптимальную нелинейную фильтрацию параметров интерферометрического сигнала. Несмотря на то, что алгоритм марковской фильтрации характеризуется сравнительно высокой вычислительной сложностью, он может рассматриваться как перспективный при использовании современных быстродействующих вычислительных средств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуров И.П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6–30.
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. *Optical Coherence Tomography. Technology and Applications.* W. Drexler, J.G. Fujimoto, eds. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 1346 p.
4. *Васильев В.Н., Гуров И.П.* Сравнительный анализ методов оптической когерентной томографии // *Известия ВУЗов. Приборостроение.* 2007. Т. 50. № 7. С. 30–40.
5. *Dubois A., Grieve K., Moneron G., Lecaque R., Vabre L., Boccara C.* Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. P. 2874–2883.
6. *Oh W.Y., Bouma B.E., Iftimia N., Yun S.H., Yelin R., Tearney G.J.* Ultrahigh-resolution full-field optical coherence microscopy using InGaAs camera // *Opt. Expr.* 2006. V. 14. P. 726–735.
7. *Gurov I., Volynsky M.* Interference fringe analysis based on recurrence computational algorithms // *Optics and Lasers in Engineering.* 2012. V. 50. P. 514–521.
8. *Пугачев В.С., Синицын И.Н.* Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. М.: Наука, 1990. 632 с.
9. *Gurov I., Ermolaeva E., Zakharov A.* Analysis of low-coherence interference fringes by the Kalman filtering method // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2004. V. 21. P. 242–251.
10. *Gurov I., Volynsky M., Zakharov A.* Evaluation of multilayer tissues in optical coherence tomography by the extended Kalman filtering method. In: *Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser Technologies for Medicine.* V. Panchenko, A. Larichev, G. Zheltov, eds // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6734. P. 6734–01.
11. *Гуров И.П., Захаров А.С.* Анализ характеристик интерференционных полос методом нелинейной фильтрации Калмана // *Опт. и спектр.* 2004. Т. 96. В. 2. С. 210–216.
12. *Gurov I., Volynsky M., Vorobeva E.* Dynamic wavefront evaluation in phase shifting interferometry based on recurrence fringe processing. In: *Int. Conf. on Advanced Phase Measurement Methods in Optics and Imaging* // *AIP Conf. Proc.* 2010. V. 1236. P. 479–484.
13. *Дуб Д.* Вероятностные процессы. М.: ИЛ, 1956. 606 с.
14. *Ярлыков М.С., Миронов М.А.* Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993. 462 с.
15. *Gurov I., Sheynihovich D.* Interferometric data analysis based on Markov non-linear filtering methodology // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2000. V. 17. P. 21–27.