

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2012 г. В. М. Геликонов^{*,**}, Г. В. Геликонов^{*,**}, Д. А. Терпелов^{*,**}, П. А. Шилигин^{*,**}

**Институт прикладной физики РАН*

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

*** ООО “Биомедицинские технологии”*

Россия, 603155, Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 31/9

E-mail: gelikon@ufr.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 06.07.2011 г.

Описана установка для визуализации внутренней структуры частично рассеивающих излучение сред методом спектральной оптической когерентной томографии (о.к.т.). Для борьбы с типичными для метода артефактами разработан специальный комплекс электронных интерфейсных систем, обеспечивающий быстроедействие системы спектральной о.к.т. на уровне 10000 А-сканов (продольных сканов в глубину) в секунду, высокий динамический диапазон изображения, а также полное подавление специфических для спектрального метода когерентных помех.

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая когерентная томография (о.к.т.) как метод визуализации внутренней структуры оптически мутных сред с высоким пространственным разрешением (около единиц микрон) основана на методах волоконно-оптической низкокogerентной интерферометрии [1, 2]. В методе о.к.т. объект зондируется излучением в “терапевтическом окне прозрачности” (0.8–1.3 мкм), длина когерентности которого обусловлена шириной его спектра и имеет типичное значение ~10 мкм. Для селекции по глубине рассеянного назад на оптических неоднородностях излучения традиционно используется интерферометр Майкельсона. Регулярный сигнал на выходе фотодетектора имеет ненулевое значение, когда разность длин оптических путей до опорного отражателя и до рассеивающего элемента в образце находится в пределах длины когерентности излучения.

Идеологически наиболее простым является корреляционный метод о.к.т., в котором сигнал регистрируется на частоте доплеровского сдвига при механическом изменении разности длин плеч интерферометра с постоянной скоростью [1]. Основной сложностью при разработке интерфейсных систем в таком методе является необходимость обеспечения высокой стабильности скорости изменения разности длин плеч интерферометра на несколько тысяч оптических длин волн в условиях проявления механических резонансов [3]. Это необходимо для осуществления узкополосного приема сигнала с большим динамическим диапазоном. Корреляционный метод уступает по быстрдействию альтернативному спектральному методу о.к.т. [4].

Спектральный метод о.к.т. основан на получении функции обратного рассеяния зондирующего широкополосного излучения в объекте исследования путем измерения оптического спектра суммарного поля двух интерферирующих волн – опорной и рассеянной назад объектом [5]. Метод потенциально обеспечивает большую скорость получения изображений при сохранении динамического диапазона системы и не предполагает использования доплеровского сдвига между частотами интерферирующих волн.

Метод получил широкое распространение в последнее время в связи с появлением быстрых матриц фотоприемников, что позволило реализовать компактные приборы спектральной о.к.т. Однако, поскольку в этом методе осуществляется автодинный прием, существенным недостатком метода является появление ряда специфических артефактов [6–8]. Частично задача устранения таких артефактов решается с помощью интерфейсных систем [9–12].

Дополнительные осложнения интерфейсных систем возникли при разработке компактных о.к.т.-приборов для эндоскопического применения [13]. Необходимость использования сменных зондов привела к существенному усложнению оптической схемы [14]. В новом варианте оптическая схема выполняется в тандемном виде и включает в себя измерительный интерферометр Физо и компенсирующий интерферометр Майкельсона [15]. Использование тандемных схем ограничивает возможности ряда оптических решений при реализации максимального динамического диапазона и переносит задачу устранения

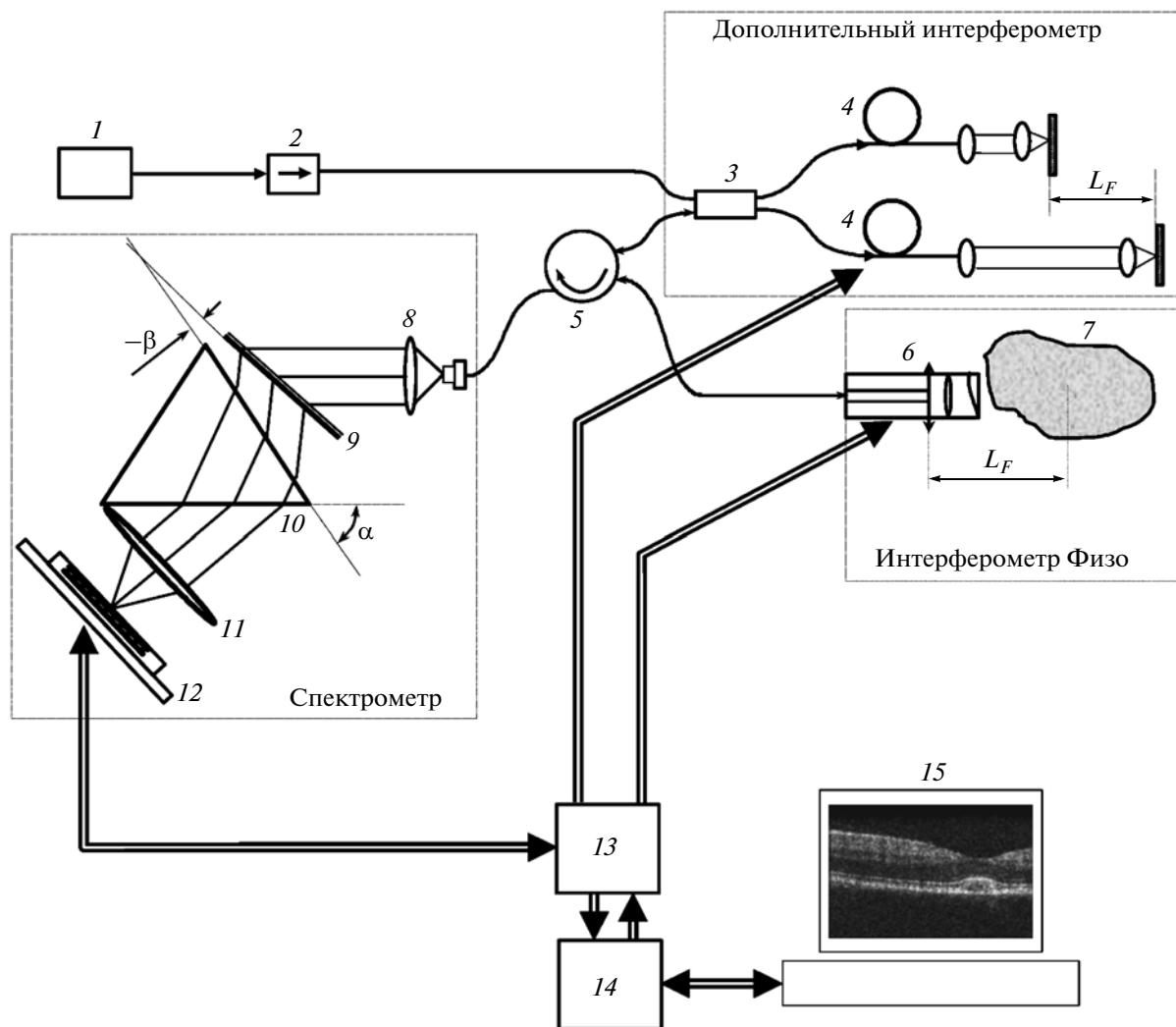


Рис. 1. Оптическая когерентная томография с параллельной регистрацией спектральных компонент суммы интерферирующих волн. 1 – источник широкополосного излучения, 2 – оптический фильтр, 3 – 3 дБ ответвитель, 4 – пьезо-керамические модуляторы, 5 – оптический циркулятор, 6 – сканирующая система, 7 – исследуемый объект, 8 – коллимирующая линза, 9 – дифракционная решетка, 10 – призма-компенсатор, 11 – фокусирующая линза, 12 – линейный массив фотоэлементов, 13 – интерфейсные системы, 14 – быстродействующий аналого-цифровой преобразователь, 15 – Э.В.М.

артефактов также в область интерфейсных систем.

В настоящей работе описываются электронные интерфейсные системы для спектральной о.к.т., обеспечивающие высокий динамический диапазон системы и возможность полного подавления специфических для спектрального метода когерентных помех.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Оптическая схема метода спектральной о.к.т., для которого разрабатывались описанные в работе интерфейсные системы, представлена на рис. 1. Особенностью установки является использование интерферометров Майкельсона и Физо, включен-

ных по тандемной схеме. Подобная оптическая схема использовалась ранее в офтальмологическом о.к.т. [16] и для контроля толщины стекла [17].

Необходимость использования в методе о.к.т. воздушного интерферометра Физо, в котором одним из отражателей является оптическая поверхность выходного торца волокна зонда, а вторым – исследуемый объект [13], продиктована требованием обеспечения взаимозаменяемости гибких зондов. В классической схеме на интерферометре Майкельсона взаимозаменяемости зондов препятствует разброс дисперсионных параметров оптических волокон. В схемах с интерферометром Физо оптический путь для опорной и сигнальной волн является общим, и он не вносит искажений в интерференционный сигнал.

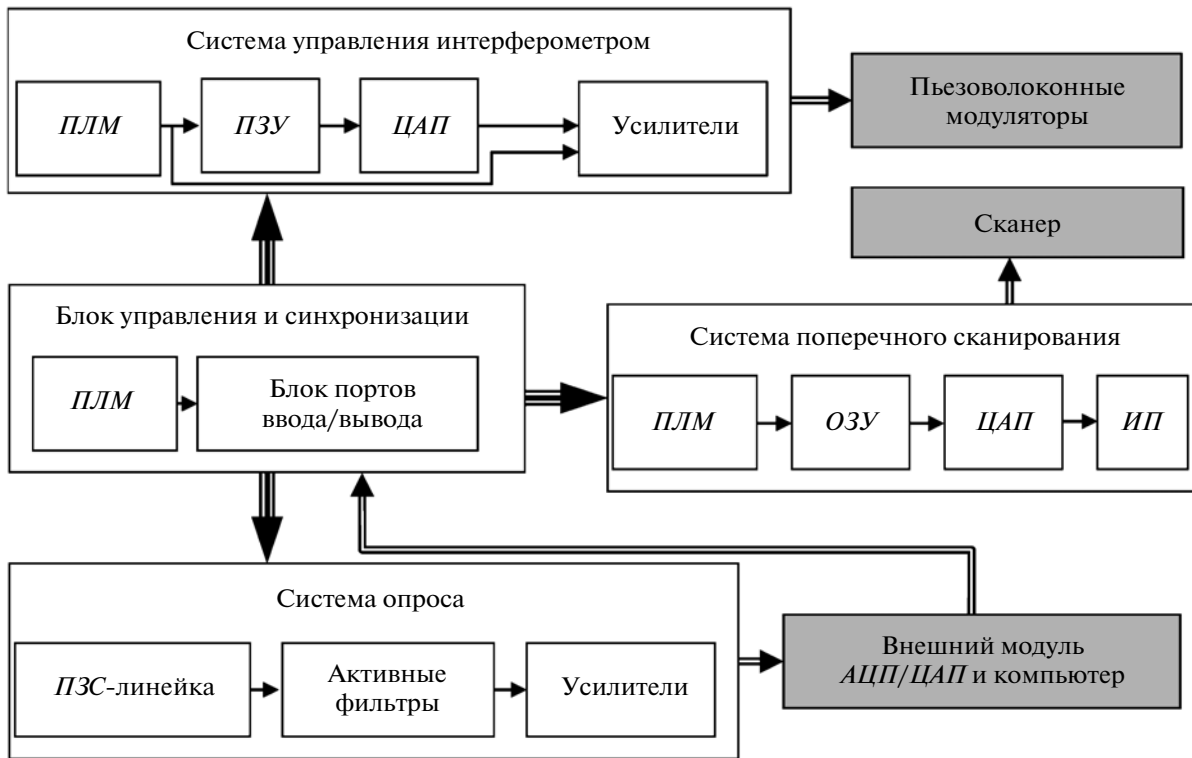


Рис. 2. Блок-схема электронных интерфейсных систем для спектральной оптической когерентной томографии.

Технологически обусловленная длина базы интерферометра Физо в несколько раз превышает глубину наблюдения объекта, поэтому при спектральном приеме сигнала возникает необходимость регистрации избыточно узких спектральных компонент. Это обусловлено тем, что длина когерентности отдельно регистрируемой спектральной компоненты, которая обратно пропорциональна ее спектральной ширине, должна вдвое превышать максимальную разность хода в интерферометре. Использование компенсирующего интерферометра Майкельсона позволяет сократить максимальную разность хода между сигнальной и опорной волнами примерно до значения исследуемой глубины объекта.

Для освещения объекта исследования в схеме используется источник широкополосного излучения (суперлюминесцентный диод) с центральной длиной волны $\lambda = 1277$ нм и шириной полосы на полувысоте $\Delta\lambda = 70$ нм. Излучение через оптический изолятор поступает на вход интерферометра Майкельсона, обеспечивающего задержку излучения, необходимую для последующей компенсации избыточной разности хода волн в интерферометре Физо. Опорная волна, отраженная от торца волокна в зонде, и волна, рассеянная объектом в обратном направлении, через циркулятор подаются на спектрометр, основным дис-

персионным элементом которого является дифракционная решетка.

Разложенная в спектр сумма интерферирующих волн регистрируется п.з.с.-матрицей (охлаждаемая линейка фотодиодов SU512LD производства Sensors Unlimited). Поскольку структура картины рассеяния в глубину восстанавливается с использованием обратного преобразования Фурье, точность восстановления определяется эквидистантностью регистрации компонент оптического спектра. Для коррекции положения отдельных спектральных компонент на фотоприемнике используется компенсирующая призма [18]. Сигнал с п.з.с.-матрицы поступает на схему двойной коррелированной выборки (д.к.в.) и далее – на вход быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) E20-10 (L-Card) с интерфейсом USB2.0.

Для управления оптической системой, считыванием и для частичной предварительной обработки сигнала был разработан комплекс электронных интерфейсных систем, блок-схема которого представлена на рис. 2. По виду выполняемых задач интерфейсные системы могут быть условно разделены на 4 блока: блок управления и синхронизации, система опроса, система управления интерферометром и система поперечного сканирования.

БЛОК УПРАВЛЕНИЯ И СИНХРОНИЗАЦИИ

Связь системы спектральной о.к.т. с персональным компьютером осуществляется через цифровой интерфейс модуля быстродействующего аналого-цифрового преобразования E20-10 производства L-Card. В задачи блока управления и синхронизации входят: формирование управляющих напряжений для всех элементов установки, синхронизация отдельных блоков, корректировка фронтов тактовых импульсов, а также управление режимами электропитания и функционирования системы, в том числе в режиме холостого хода. Последний режим применяется для поддержания системы приема оптического поля в состоянии готовности перед началом рабочего цикла. Рабочий цикл п.з.с.-матрицы заключается в накоплении фотоэлектронов на емкости фотоприемника, считывании и последующем обнулении.

Для формирования управляющих импульсов используется цифровой интерфейс внешнего модуля АЦП/ЦАП E20-10 производства L-Card. На выходе устройства с помощью встроенного генератора формируется тактовый сигнал заданной частоты и импульс кадра, запускающий программируемый управляющий элемент на основе программируемой логической матрицы (ПЛМ) ALTERA EP7064SLC44-10.

Для обеспечения совместимости интерфейсов устройств E20-10 и фотоприемной матрицы ПЛМ осуществляет деление основной частоты на 2 и формирование дополнительного тактового сигнала, смещенного на 1 такт задающего генератора. Это позволяет вести двухканальную оцифровку выходного сигнала модулем E20-10 на обоих фронтах тактового сигнала п.з.с.-матрицы. Полученные таким образом тактовые сигналы подаются на соответствующие входы системы регистрации.

На входах ПЛМ посредством цифрового интерфейса модуля E20-10 формируется последовательность, задающая общую длительность и скважность формируемого блоком управления затворного импульса для системы фоторегистрации. По окончании импульса кадра управляющий элемент на базе ПЛМ формирует тактовый сигнал на той же частоте, что и поступающий тактовый сигнал с E20-10. Это позволяет осуществить сброс п.з.с.-матрицы в исходное состояние в случае некорректного завершения рабочего цикла, тем самым предотвратив искажения, возможные при следующем запуске.

Кроме того, на выводах ПЛМ формируются дополнительные управляющие сигналы, необходимые для функционирования других узлов системы – блока компенсации когерентных помех и блока управления сканированием в объектном плече измерительного интерферометра. Программирование ПЛМ осуществлялось в среде QUARTUS® II v 5.1. Объем программного кода

составил ~1000 логических элементов. Возможность перепрограммирования ПЛМ позволяет пользователю изменять по своему желанию режимы работы устройства и предварительной обработки сигналов.

СИСТЕМА ОПРОСА

Система опроса включает в себя линейный массив фотоприемников, дифференциальные усилители и фильтры для каждого из выходных каналов п.з.с.-матрицы. Конфигурация выходного каскада п.з.с.-матрицы SU512LD-1.7T1 позволяет компенсировать неравномерность темновых значений фототока каждого элемента. Для этого в блоке регистрации предусмотрены два идентичных дифференциальных усилителя, собранных на микросхеме AD8032.

Кроме того, блок регистрации обеспечивает смещение нулевого уровня выходного сигнала для более полной реализации диапазона АЦП. Также предусмотрена возможность низкочастотной и высокочастотной фильтрации каждого из выходных каналов п.з.с.-матрицы. Отдельно формируемое биполярное напряжение питания обеспечивает эффективную работу дифференциальных усилителей и фильтров.

Для достижения максимально возможного отношения сигнал/шум такие параметры системы, как время накопления заряда на п.з.с.-элементе и мощность излучения на входе в спектрометр, регулировались в соответствии с выводами [15]. Это позволило реализовать прием сигнала при суммарном уровне тепловых шумов, шума опроса элемента и шума биений спектральных компонент, существенно меньшем дробового предела.

Кроме того, был предпринят комплекс мер для снижения влияния на полезный сигнал шумов выходных каскадов электроники. В результате выбора малозумящих микросхем, фильтрации по питанию и расчета топологии печатных плат вклад шумов электроники был снижен по сравнению с уровнем оптического дробового шума примерно на 20 дБ. Для минимизации непосредственного влияния на сигнал темновых значений фототока дифференциальные усилители были построены по схеме двойной коррелированной выборки. Устойчивость приемной системы к наводкам была обеспечена введением в электрические контуры ферритовых фильтров и дополнительных фильтров в цепи питания микросхем.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

Кроме оптических шумов и шумов электроники в сигнале спектральной о.к.т. присутствуют дополнительные помехи, артефакты, обусловленные паразитной изрезанностью спектра излучения, не

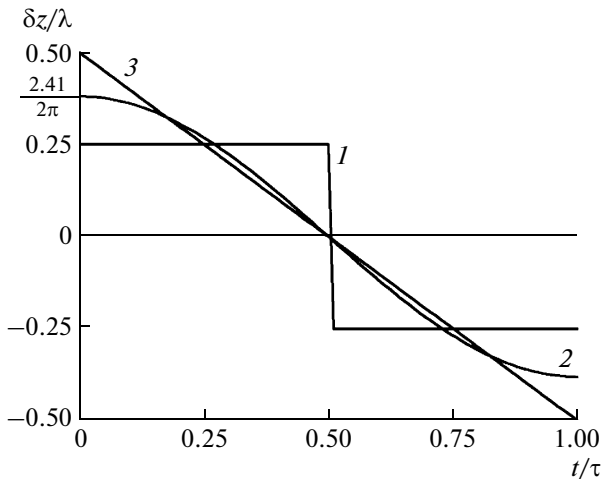


Рис. 3. Функции фазовой модуляции, удовлетворяющие условию подавления кросскорреляционной составляющей в принимаемом спектре: 1 — прямоугольная форма; 2 — гармоническая форма; 3 — линейная форма.

связанной с интерференцией между опорной и рассеянной волнами. Источниками этой изрезанности спектра являются как изначальная неоднородность спектра излучения источника, так и наличие паразитных переотражений и рассеяния в оптическом тракте системы.

Кроме того, существенное влияние в спектральном методе о.к.т. приобретают артефакты, связанные с взаимной интерференцией рассеянных в объекте волн [6, 19]. Несмотря на довольно большое количество подходов к решению проблемы, она до сих пор остается актуальной, о чем свидетельствует непрекращающийся интерес к ней исследователей [7, 20].

На наш взгляд, наиболее эффективный метод компенсации когерентных помех был предложен в [19], однако он требует некоторой доработки и исследования. Описанная в [19] методика компенсации когерентных помех заключается в раздельном измерении информативного оптического спектра и его артефактной составляющей. Последняя составляющая регистрируется отдельно, для чего во время дополнительной экспозиции спектра осуществляется модуляция длины опорного плеча измерительного интерферометра. При определенном законе модуляции фазы между опорной и рассеянной волнами сигнал интерференции усредняется за время, кратное периоду модуляции. Это приводит к занулению информативной составляющей в принимаемом спектре [19]. При вычитании из информативного спектра полученной таким образом артефактной составляющей можно получить сигнал, свободный от влияния когерентных помех.

Базовые формы модулирующей функции, согласно [19], представлены на рис. 3, на котором временная шкала отнесена к времени накопления τ заряда на емкости фотоэлемента, а амплитуда модуляции — к амплитуде центральной длины волны λ широкополосного излучения. Модуляция длины опорного плеча осуществляется во время каждой второй экспозиции по гармоническому закону при помощи пьезоволоконных модуляторов, которые в противофазе включены в плечах компенсирующего интерферометра Майкельсона.

Для соблюдения условия синхронности модуляции длины опорного плеча и интегрирования световой мощности массивом фотоприемников, а также для учета особенностей режимов работы п.з.с.-матрицы форма подаваемого на модуляторы напряжения записывается в устройство чтения/записи информации, построенное на микросхеме постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) фирмы Atmel AT28С64Е. Для формирования аналогового сигнала с выхода устройства чтения/записи информации использовался ЦАП на микросхеме AD7524 фирмы Analog Devices.

Для минимизации искажения полезного сигнала при компенсации когерентных помех необходимо учесть нелинейности пьезоволоконных модуляторов оптического пути и элементов электронной схемы. При этом точность восстановления сигнала при компенсации когерентных помех определяется точностью изменения длины оптического пути в опорном плече интерферометра Майкельсона. Нелинейность пьезоволоконного модулятора, вносящая искажения в действительное изменение оптической длины опорного плеча, может приводить к существенным (более 10%) искажениям величины восстанавливаемого сигнала. Эта нелинейность в разработанной системе учитывается при формировании напряжения, модулирующего разность хода в интерферометре.

На рис. 4 кривая 3 соответствует напряжению, скорректированному по методике, описанной в [3], при условии, что кривая 1 есть необходимое напряжение, а кривая 2 — отклик системы. В итоге в разработанной системе величина искажения сигнала при компенсации когерентных помех не превышает 1%.

Для иллюстрации компенсации когерентных помех в системе был записан спектр при размещении в объектном плече интерферометра плоского отражателя. На рис. 5 представлены экспериментально полученные распределения напряжений, снимаемых с фотоэлементов в описанной системе. Кривая 1 получена при модуляции оптической разности хода во время накопления заряда, а кривые 2 и 3 — при ее отсутствии. Кривая 4 получена вычитанием кривой 1 из кривой 2 и иллюстрирует компенсацию когерентных помех в системе.

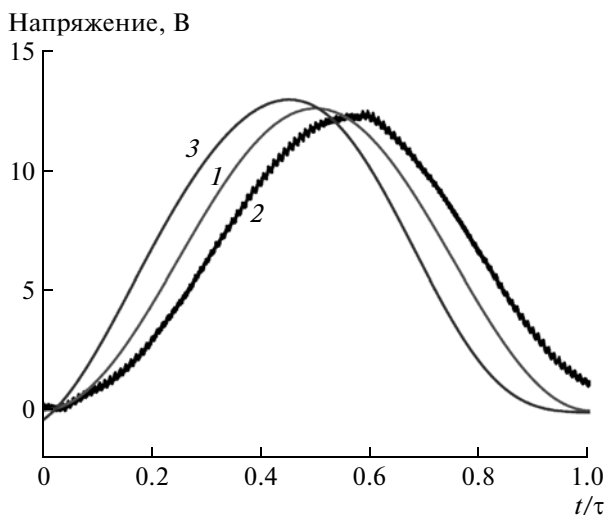


Рис. 4. Коррекция напряжения, подаваемого на систему управления интерферометром: 1 – требуемое напряжение при отсутствии искажений, 2 – отклик системы, 3 – скорректированное напряжение.

Кривые 2 и 3 получены при внесении относительных задержек между опорным и объектным излучением, отличающихся на четверть длины волны, для регистрации квадратурных компонент спектра интерферирующих волн и формирования полного комплексного спектра. Это позволяет подавить возникающие в спектральной о.к.т. при обратном преобразовании Фурье зеркальные артефакты [7], обусловленные вырождением регистрируемого сигнала по знаку задержки.

СИСТЕМА ПОПЕРЕЧНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Система поперечного сканирования предназначена для перемещения оптического луча вдоль поверхности исследуемого объекта по обеим поперечным координатам и содержит блок формирования управляющего напряжения, подаваемого на сканер, и систему гальванической изоляции. Блок формирования управляющего напряжения содержит ЦАП, микросхемы оперативного запоминающего устройства ОЗУ, ПЛМ, блок параллельных портов ввода/вывода. Применение системы гальванической изоляции является необходимым условием для использования установки в медицинских приложениях. Такая система предназначена для гальванической развязки сканера и пациента. Для этого использована изолирующая плата (ИП) на основе развязывающего усилителя ISO 122 фирмы Вигт-Вгown. Сканер представляет собой электромеханическую систему, состоящую из катушек и постоянных магнитов, с линейным отклонением по току. Управляющий сигнал для системы поперечного сканирования формируется в блоке управления и синхронизации.

На рис. 6 представлены изображения модельной среды и кожи пальца человека, полученные в системе спектральной о.к.т. под управлением разработанных интерфейсных систем с быстродействием до 10^4 А-сканов/с.

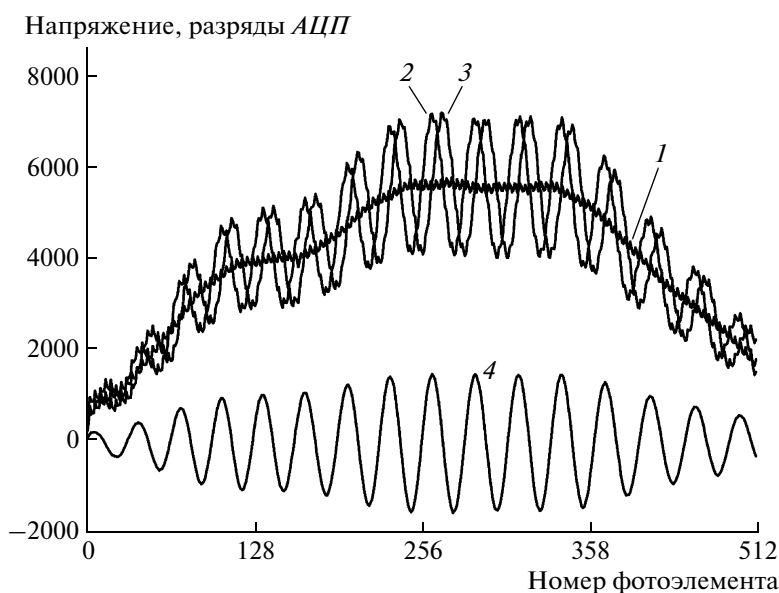


Рис. 5. Спектр на выходе интерферометра: 1 – при модуляции оптической разности хода во время экспозиции; 2 – в отсутствие модуляции; 3 – при внесении относительной задержки в четверть длины волны между опорным и объектным излучением; 4 – результат вычитания значений кривой 1 из значений кривой 2.

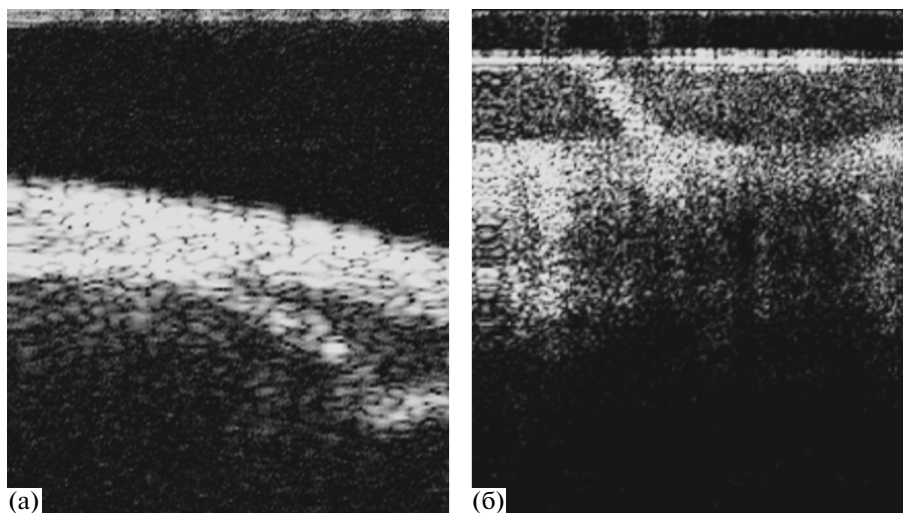


Рис. 6. Изображения модельной среды (а) и кожи пальца человека (б), полученные в системе спектральной о.к.т. под управлением разработанных интерфейсных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан комплекс электронных интерфейсных систем для спектральной о.к.т., состоящий из блока управления и синхронизации, системы опроса, системы управления интерферометром и системы поперечного сканирования. Комплекс позволил наблюдать в режиме реального времени о.к.т.-изображения с дробовым шумовым пределом с подавлением всех основных типов когерентных помех. Разработанные электронные интерфейсные системы позволили получить изображения внутренней структуры оптически мутных рассеивающих сред со скоростью до 10^4 А-сканов/с (~ 40 кадров/с с 256×256 элементами в кадре).

Работа частично поддержана фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К. (госконтракт № 7379 р/10164 от 28 декабря 2009 г.) и ФЦП Минобрнауки РФ (госконтракт № 16.512.11.2002 от 10.02.2011 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang D., Swanson E.A., Lin C.P. et al. // Science. 1991. V. 254. P. 1178.
2. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Гладкова Н.Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. № 2. С. 149.
3. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Ксенофонтов С.Ю. и др. // ПТЭ. 2010. № 3. С. 133.
4. Choma M.A., Sarunic M.V., Yang C.H. et al. // Optics Express. 2003. V. 11. № 18. P. 2183.
5. Fercher A.F., Hitzinger C.K., Kamp G. et al. // Optics Communications. 1995. V. 117. № 1. P. 43.
6. Leitgeb R.A., Wojtkowski M. // In: Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. J.G. Fujimoto, W. Drexler, Editors. Berlin: Springer, 2008. P. 177.
7. Геликонов В.М., Касаткина И.В., Шлягин П.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 11. С. 897.
8. Steiner P., Meier C., Koch V.M. // Appl. Opt. 2010. V. 49. № 36. P. 6917.
9. Leitgeb R.A., Hitzinger C.K., Fercher A.F. et al. // Optics Letters. 2003. V. 28. № 22. P. 2201.
10. Gotzinger E., Pircher M., Leitgeb R.A. et al. // Optics Express. 2005. V. 13. № 2. P. 583.
11. Yun S.H., Tearney G.J., de Boer J.F. et al. // Optics Express. 2004. V. 12. № 20. P. 4822.
12. Bachmann A.H., Leitgeb R.A., Lasser T. // Optics Express. 2006. V. 14. № 4. P. 1487.
13. Геликонов В.М., Геликонов Г.В. // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 7. С. 634.
14. Feldchtein F., Bush J., Gelikonov G. et al. // Proc SPIE. 2005. V. 5690. P. 349.
15. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Шлягин П.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72. № 1. С. 104.
16. Fercher A.F. // Journal of Biomedical Optics. 1996. V. 1. № 2. P. 157.
17. Ivanov V.V., Novikov M.A., Tertyshnik A.D. et al. // Remote gauging with fiber optic low-coherence tandem interferometry: new industrial applications Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. Novosibirsk, Russia, 2002. V. 4900. P. 548.
18. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Шлягин П.А. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 3. С. 518.
19. Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Касаткина И.В. и др. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 6. С. 1006.
20. Moon S., Lee S., W.Chen Z. // Optics Express. 2010. V. 18. № 24. P. 24395.