

УДК 535.417+681.785.554

ЭКВИДИСТАНТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

П. А. Шильягин^{1*}, *С. Ю. Ксенофонов*^{1,2}, *А. А. Мусеев*¹, *Д. А. Терпелов*¹,
*В. А. Маткинский*¹, *И. В. Касаткина*¹, *Ю. А. Мамаев*¹, *Г. В. Геликонов*¹,
*В. М. Геликонов*¹

¹ Институт прикладной физики РАН;

² ООО «Биомедицинские технологии», г. Нижний Новгород, Россия

Разработан эффективный метод снижения неэквидистантности при регистрации спектральных компонент интерференционного сигнала в сверхширокополосной спектральной оптической когерентной томографии. Для этой цели в спектрометре на дифракционной решётке использован корректор, состоящий из двух идентичных призм. Поворот корректора относительно плоскости дифракционной решётки и изменение угла между элементами корректора позволяет настраивать эквидистантное пространственное распределение спектральных компонент на линейке фотоприёмников. Экспериментально показано, что разработанный метод заменяет цифровую коррекцию и приводит к существенному снижению вычислительной нагрузки в устройстве оптической когерентной томографии.

ВВЕДЕНИЕ

Спектральный вариант оптической когерентной томографии (ОКТ) основан на анализе спектра интерференции опорной и рассеянной объектом волн. Этот спектр получается при помощи дифракционной решётки [1, 2] и записи углового спектра, отображаемого объективом в фокальной области на линейке фотоприёмников.

Принципиальная схема устройства ОКТ спектрометрического типа представлена на рис. 1. В основе устройства лежит интерферометр Майкельсона, образованный оптическим делителем и опорным и объектным оптическими трактами. Информация о пространственной внутренней структуре объекта по направлению зондирования содержится в амплитуде и эффективной частоте изрезанности огибающей функции оптического спектра. При этом частота изрезанности обратно пропорциональна разности хода (оптической задержке) между интерферирующими волнами, а амплитуда пропорциональна амплитуде зондирующей волны, возвращённой с соответствующей глубины в объекте. Структура обратного рассеяния в исследуемом объекте восстанавливается для каждого положения зондирующего луча в виде распределения коэффициента обратного рассеяния среды по глубине (А-скана) расчётным образом при использовании преобразования Фурье оптического спектра.

Регистрация интерференционного ОКТ-сигнала, соответствующая одному А-скану по глубине, осуществляется с использованием спектрометра, диспергирующий элемент которого, как правило, представлен дифракционной решёткой, оптимизированной для работы в минус первом порядке дифракции. Фокусирующий элемент преобразует угловое распределение диспергированного излучения в пространственное в плоскости линейки фотоприёмников. Отклонение полученного распределения волнового числа k от линейного в пространстве линейно и эквидистантно расположенных фотоприёмников составляет единицы процентов при обычной для широкополосной ОКТ относительной ширине полосы источника $8 \div 10\%$ [3]. В результате изрезанность углового спектра, соответствующая единичному рассеивателю в объектном плече интерферометра,

* paulo-s@mail.ru

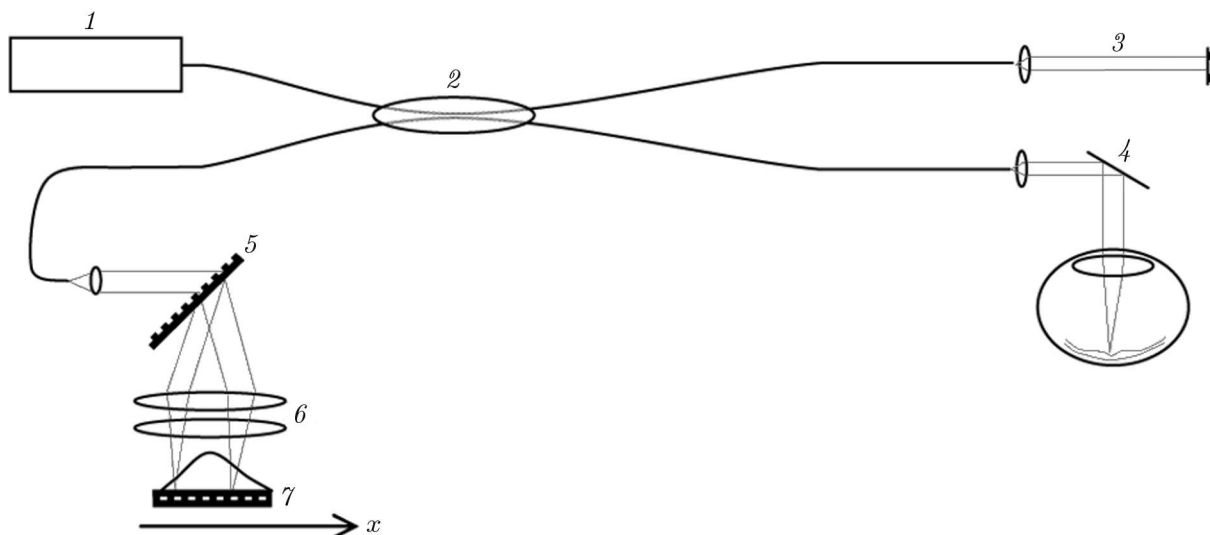


Рис. 1. Принципиальная схема спектрометрического ОКТ-устройства: 1 — широкополосный источник оптического излучения, 2 — оптический делитель, 3 — опорный отражатель, 4 — объектное плечо интерферометра, 5 — диспергирующее устройство спектрометра, 6 — фокусирующий элемент, 7 — фотоприёмный матричный элемент

фиксируется при фотодетектировании в негармоническом, частотно-модулированном, виде. При последующем фурье-преобразовании это проявляется в уширении аппаратной функции, пропорциональном глубине расположения рассеивателя, и снижении продольного разрешения устройства.

Вычислительная сложность алгоритмов обработки (параметр, характеризующий количество вычислений на выполнение той или иной операции) является одним из ограничивающих факторов при разработке современных ОКТ-систем, работающих в режиме реального времени. Существенное снижение вычислительной сложности при восстановлении профиля рассеяния исследуемого объекта достигается за счёт использования быстрого преобразования Фурье [4], однако этот метод требует строгой эквидистантности элементов преобразуемого массива (спектральных отсчётов — числовых значений, которые соответствуют интенсивностям спектральных компонент, регистрируемых отдельными элементами фотоприёмника) по аргументу (продольному волновому числу k , или оптической частоте). Причина нарушения эквидистантности спектральных отсчётов по волновому числу заключается в нелинейности дисперсионных характеристик (зависимости угла дифракции от оптической частоты падающего излучения) дифракционной решётки и некоторых модифицированных спектрометров [5–7].

Для преодоления этой трудности разработан ряд методов, позволяющих проводить коррекцию эквидистантности оптических отсчётов. Хорошо разработаны методы, основанные на реализации постобработки или коррекции сигналов при использовании предварительной калибровки спектрометра [8, 9] и передискретизации принятых спектральных отсчётов [10]. Частным случаем такой практики является использование неэквидистантных преобразований Фурье [11], которые для обеспечения высокой производительности реализуются на графических процессорах [12–15], или реализация калибровочных подходов, известных в литературе как master/slave interferometry [16].

В некоторых публикациях приводятся решения, позволяющие осуществлять аппаратную передискретизацию, что делает возможным применение быстрого преобразования Фурье без использования методов передискретизации, обладающих высокой вычислительной сложностью. Так, в статье [17] используется chirpирование тактовых импульсов, контролирующей передачу сигнала.

ла с линейки фотоприёмников на аппаратный фурье-преобразователь, что при известной зависимости волнового числа отдельно принимаемой спектральной компоненты от номера фоторегистрирующего элемента позволяет получить удовлетворительную линеаризацию спектральных отсчётов по оптической частоте. Однако использование только методов пострекции приводит к уменьшению предельной глубины видения (например, порядка 20 % при неэквидистантности регистрации спектральных компонент всего 3 %), что обусловлено нарушением критерия Котельникова для верхних частот пространственной модуляции огибающей функции оптического спектра в пределах одной аппаратной функции [3].

Другой класс методов коррекции эквидистантности спектрометра предполагает использование дополнительных элементов, корректирующих положение изображений спектральных компонент относительно отдельных элементов линейки фотоприёмников [3, 18]. Например, для этой цели могут использоваться оптические призмы, обеспечивающие удовлетворительную коррекцию при относительной ширине спектра менее 10 %. Известен ряд подходов к поиску оптимизированных конфигураций таких систем [7, 19–20], которые, однако, оказываются недостаточно эффективными при использовании сверхширокополосных (с относительной шириной оптического спектра 0,1 и более) источников излучения. В результате в спектральной ОКТ со сверхширокополосным излучением оказывается невозможным получить спектрально обусловленное разрешение без цифровой коррекции неэквидистантности даже при условии использования дополнительной аналоговой коррекции на основе одной призмы.

Целью данной работы является исследование и экспериментальная апробация возможности создания эквидистантного по оптической частоте спектрометра, имеющего в качестве корректирующего элемента составную призму. Главной особенностью такого спектрометра является возможность его гибкой настройки при регистрации широких оптических спектров излучения, а также при использовании составных источников с суммарной относительной шириной спектра более 10 %.

1. КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ НЕЭКВИДИСТАНТНОСТИ СПЕКТРОМЕТРА ПРИ ЛОГАРИФМИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ОКТ-СИГНАЛА

Неэквидистантность спектрометра является основной характеристикой, определяющей уширение аппаратной функции изображения в спектральной ОКТ. Она обусловлена нелинейной зависимостью между волновым числом k отдельно регистрируемой спектральной компоненты и положением $x(k)$ её проекции на многокомпонентном фотоприёмном устройстве. В соответствии с терминологией, принятой в статье [3], под неэквидистантностью в рамках данной работы понимается отношение размаха отклонения распределения $x(k)$ от его линейной аппроксимации $x_1(k)$ ко всей ширине проекции регистрируемого оптического спектра Δx . При регистрации оптического спектра дискретным набором фотоприёмников это определение может быть записано в виде

$$\delta\epsilon = \frac{\|x(k) - x_1(k)\|}{\Delta x}, \quad (1)$$

где $\|x(k) - x_1(k)\|$ — норма функции $x(k) - x_1(k)$, определяемая как её размах на интервале Δx . В статье [3] показано, что уширение Δz аппаратной функции ОКТ на уровне полувывсоты пропорционально произведению неэквидистантности $\delta\epsilon$ на оптическую задержку между интерферирующими волнами $2z$. В спектрометре на дифракционной решётке при типичных для ОКТ значениях центральной длины волны, ширины спектра источника и частоты штрихов дифракци-

онной решётки неэквидистантность составляет единицы процентов, что приводит к многократному нарастанию ширины аппаратной функции с увеличением глубины положения рассеивателя z .

Для коррекции неэквидистантности спектрометра в статьях [18] и [21] независимо было предложено использовать оптическую призму, вносящую изменения в дисперсионную зависимость спектрометра. При этом в работе [21] было показано, что учёт дисперсии материала, из которого изготовлена призма, не играет существенной роли при коррекции неэквидистантности спектрометра. Основной вклад в изменение углового распределения спектральных компонент на выходе спектрометра вносят угол при вершине призмы и её поворот относительно плоскости дифракционной решётки. Правильный выбор этих параметров обеспечивает подавление неэквидистантности спектрометра более чем в 100 раз относительно спектрометра, не имеющего дополнительных элементов. В этом случае представляется возможным построить поверхность, описывающую неэквидистантность в координатах (α, β) , где α и β — угол при вершине призмы и угол её поворота относительно плоскости дифракционной решётки соответственно. В пределах физически допустимых параметров (вне углов полного внутреннего отражения излучения на выходной грани призмы) поверхность $\delta\varepsilon(\alpha, \beta)$ является гладкой с единственным минимумом [21], что позволяет определить оптимальные значения параметров α_{opt} и β_{opt} , а также выделить односвязную область (α, β) , в которой неэквидистантность не превышает определённого значения $\delta\varepsilon_{\text{cr}}$. Величина $\delta\varepsilon_{\text{cr}}$ определяется максимально допустимым уширением аппаратной функции ОКТ-отображения.

В статье [3] было показано, что при выполнении критерия

$$\delta\varepsilon \leq \delta\varepsilon_{\text{cr}} = 1/N, \quad (2)$$

где N — число независимо регистрируемых спектральных компонент, аппаратная функция линейного ОКТ-отображения испытывает не более чем двукратное уширение при максимальной задержке интерферирующих волн, определяемой из условия $2\Delta k z_{\text{max}} = \pi N$, где Δk — полная ширина полосы регистрации спектрометра и z_{max} — максимальная наблюдаемая глубина положения рассеивателя. Метод ОКТ, однако, позволяет регистрировать широкий диапазон интенсивностей рассеянного излучения (порядка 100 дБ [2], при этом с ростом глубины расположения рассеивателя в однородно рассеивающей среде интенсивность возвращённого сигнала убывает по экспоненциальному закону), и для его эффективной визуализации линейной яркостной шкалы недостаточно. В связи с этим при построении изображений ОКТ используется логарифмический масштаб по шкале интенсивности. Это, в свою очередь, приводит к визуальному уширению изображения объекта по сравнению с изображением, получаемым с использованием линейной шкалы. Это связано с тем, что решающую роль при определении ширины аппаратной функции логарифмического ОКТ-отображения начинает играть ширина по полувысоте её логарифмического образа, что приводит к необходимости ужесточения требований к величине $\delta\varepsilon_{\text{cr}}$ по сравнению с (2).

На рис. 2 приведены профили восстанавливаемого изображения (А-сканы) при зондировании трёх тонких границ. Кривая 1 соответствует восстановленному сигналу, полученному в экспери-

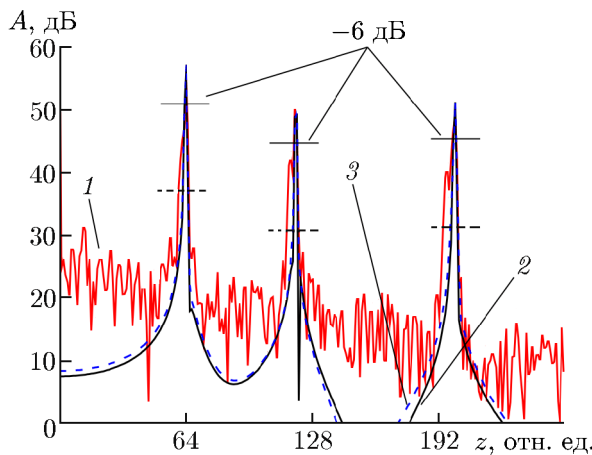


Рис. 2. Уширение изображения тонкой границы при построении изображения в логарифмическом масштабе: 1 — восстановленный профиль сигнала при наличии на пути зондирующего луча трёх тонких границ при выполнении критерия $\delta\varepsilon < 1/N$, 2 — эквидистантная модель, 3 — модель, построенная с учётом усиленного критерия $\delta\varepsilon < 1/(10N)$

менту. Кривая 2 соответствует восстановленному сигналу, полученному в экспери-

менте при соблюдении условия (2), кривая 2 — модельному сигналу без шумовой компоненты, построенному при эквидистантном расположении спектральных отсчётов. Из рис. 2 хорошо видно, что на уровне -6 дБ (для каждого пика уровень показан сплошной линией отсечки) уширения изображений рассеивателей не происходит. Это соответствует физическому смыслу, закладываемому в критерий (2). Однако в логарифмическом масштабе на уровне полувысоты над уровнем шумов (показано пунктирной линией отсечки) наблюдается более чем двукратное увеличение ширины аппаратной функции, что при оценке ОКТ-изображений визуально воспринимается как потеря разрешения.

Прямое аналитическое определение критерия представляется затруднительным, т. к. в условиях частичной компенсации неэквидистантности зависимость $x(k)$ не может быть аппроксимирована параболическим законом [21]: в результате частичной коррекции неэквидистантности становится существенным влияние третьего и более высоких порядков полиномиального разложения зависимости $x(k)$. Численное моделирование при введении модельной неэквидистантности спектрометра с профилем, приближённым к экспериментально зарегистрированному, показало, что критерий (2) должен быть усилен по крайней мере в 10 раз:

$$\delta\varepsilon \leq \delta\varepsilon_{\text{cr}} = 1/(10N). \quad (3)$$

В этом случае возможно полное подавление уширения аппаратной функции восстанавливаемого изображения, что иллюстрируется штриховой кривой 3 на рис. 2. Однако использование «усиленного» критерия (3) существенным образом уменьшает размер области удовлетворительной компенсации неэквидистантности. Кроме снижения гибкости настройки спектрометра и необходимости изготовления индивидуальных корректирующих элементов, это приводит к невозможности использования одних и тех же параметров оптической системы для линейаризации спектрометров, настроенных для работы с несколькими источниками, имеющими различные центральные длины волн.

Частично задача удовлетворения критерию (3) может быть перенесена в область постобработки, возможности которой существенно возрастают с использованием частично скорректированных спектральных распределений и многопоточных ЭВМ.

2. ОЦЕНКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ РАСЧЁТА ОКТ-ИЗОБРАЖЕНИЯ

Расчёт ОКТ-изображения для спектральной ОКТ-системы в общем случае включает в себя следующие этапы:

- 1) преобразование исходных целочисленных данных в комплексные спектры в соответствии с выбранной методикой модуляции (при последовательной регистрации А-сканов с изменением длины опорного или объектного плеча на доли длины волны);
- 2) коррекция формы спектра;
- 3) компенсация влияния материальной дисперсии;
- 4) компенсация неэквидистантности исходных данных;
- 5) преобразование ОКТ-данных в координатное представление;
- 6) упорядочивание данных с учётом направления и типа (углового или линейного) сканирования;
- 7) преобразование комплексных данных в вещественные логарифмированные данные;
- 8) визуализация и сохранение.

Совокупность приведённых операций является достаточно сложной, поэтому для реализации этой процедуры в реальном времени в условиях использования персонального компьютера

настольного или мобильного типа, функционирующего под управлением операционной системы общего назначения (например, «Microsoft Windows»), необходимо применять приём распараллеливания вычислений. Некоторые этапы вычислений выполнимы только после полного завершения всех предыдущих этапов расчётов с использованием всех исходных или промежуточных данных при вычислении ОКТ-изображения, вследствие чего применение операции распараллеливания вычислений к описанной последовательности действий вызывает определённые затруднения. В то же время в рамках отдельных этапов или некоторых последовательных совокупностей этапов вычислений можно выделить различные группы исходных и промежуточных данных, которые можно рассчитывать независимо. Поэтому вычисление каждого В-скана (двумерного ОКТ-изображения) разбивается на три этапа. На первом этапе проводится преобразование исходных целочисленных данных в комплексные спектры в соответствии с выбранной методикой модуляции. В этом случае параллельно обрабатываются данные «строк» ОКТ-изображения. После соответствующей процедуры синхронизации начинается второй этап вычислений. Этот этап включает в себя процедуры со второй по седьмую, при этом параллельно обрабатываются данные «столбцов» ОКТ-изображения. На завершающем этапе проводятся визуализация и сохранение ОКТ-изображения.

Для оценки вычислительной сложности расчёта ОКТ-изображений были рассмотрены модель спектрометра с фотодетектором на выходе, состоящим из $N = 512$ фотоэлементов, и случай регистрации изображения, формируемого из $n = 1024$ исходных А-сканов.

За единицу вычислительной сложности принимается одно элементарное арифметическое действие с парой комплексных чисел.

Преобразование исходных целочисленных данных в комплексные спектры происходит с использованием одного прямого преобразования Фурье для n точек каждой строки (совокупность исходных данных с одинаковым номером элемента линейки), занулением постоянной составляющей и обратного преобразования Фурье для $n/2$ точек каждой строки. Вычислительная сложность этого этапа для одного В-скана оценивается как $7,6 \cdot 10^6$.

Коррекцию формы спектра и компенсацию влияния материальной дисперсии, присущей оптическим путям в интерферометре, можно свести по методике, описанной в статье [22], к умножению результата предыдущих вычислений на вычисленный заранее комплексный коэффициент, соответствующий номеру элемента линейки. Вычислительная сложность этого этапа для одного В-скана оценивается как $0,3 \cdot 10^6$.

Метод программной коррекции неэквидистантности исходных данных, используемый для оценки, подробно описан в статье [23]. Он сводится к умножению каждого А-скана (вектора с размерностью N) на корректирующую матрицу с размерностью $N \times 2N$. Существенным образом уменьшить объём вычислений возможно при использовании частичной коррекции неэквидистантности спектрометра: в этом случае корректирующая матрица имеет ненулевые значения только около своей диагонали. Вычислительную сложность оптимизированного таким образом варианта программной коррекции неэквидистантности исходных данных можно оценить как $8,4 \cdot 10^6$.

Основная процедура синтеза изображения спектральной ОКТ-системы представляет собой прямое преобразование Фурье. В случае использования программной коррекции неэквидистантности исходных данных для каждого из $n/2$ столбцов изображения оно выполняется для $2N$ точек, и вычислительная сложность этой процедуры может быть оценена как $5,2 \cdot 10^6$.

Дальнейшие совокупные вычислительные действия (выделение амплитуды, логарифмирование, нормировка цвета, визуализация) можно грубо оценить как 10 на каждую точку изображения, что в конечном итоге приводит к оценочному значению $1,3 \cdot 10^6$ для изображения с размером 512×256 элементов.

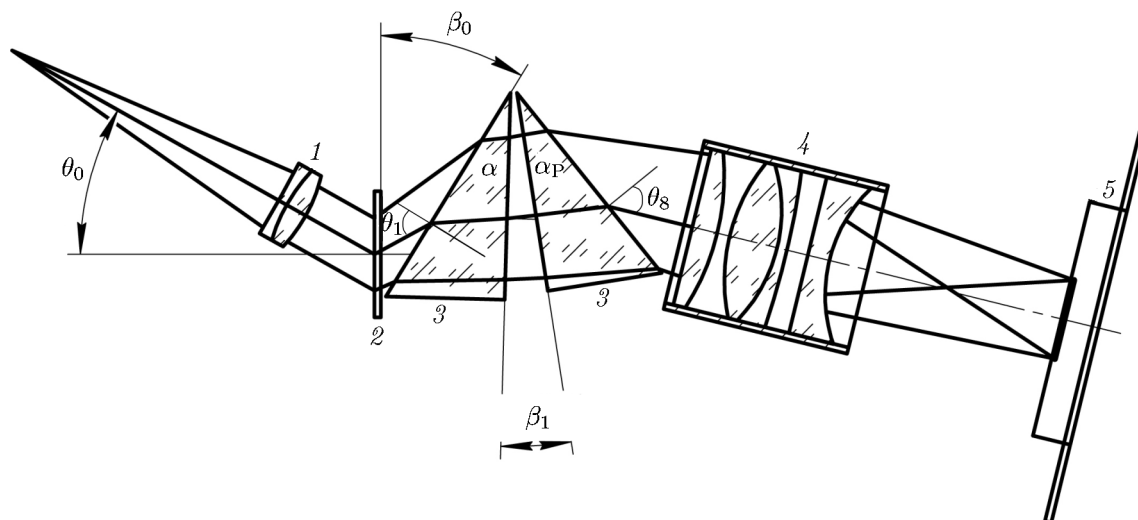


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема спектрометра для эквидистантной регистрации спектральных компонент сверхширокополосного излучения: 1 — коллимирующий элемент с оптоволоконным интерфейсом, 2 — просветная голографическая дифракционная решётка, 3 — компоненты составной призмы-корректора, 4 — фокусирующий элемент, 5 — линейный массив фотоприёмных элементов

Совокупная вычислительная сложность оценивается как $22,8 \cdot 10^6$.

3. СОСТАВНОЙ КОРРЕКТОР НЕЭКВИДИСТАНТНОСТИ СПЕКТРОМЕТРА НА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКЕ

Существенное повышение гибкости системы настройки спектрометра возможно при использовании комбинированного корректирующего элемента, состоящего из двух или более призм по аналогии с [7]. В данной работе рассматривается составной корректор неэквидистантности из двух разделённых воздушным промежутком одинаковых призм, суммарный угол при вершине которых близок, но не равен оптимальному углу α_{opt} .

Принципиальная схема этого спектрометра представлена на рис. 3. В рассматриваемой конфигурации спектрометра корректирующий элемент составлен из двух идентичных коммерчески доступных призм, имеющих угол при вершине $\alpha_F = 30^\circ$. Суммарный угол при вершинах $2\alpha_F = 60^\circ$ на 3° меньше, чем оптимальный угол призмы α_{opt} , определяемый для используемого источника и дифракционной решётки положением абсолютного минимума поверхности $\delta\varepsilon$. Основными параметрами, изменяемыми при настройке такого спектрометра, являются угол поворота составной призмы относительно плоскости дифракционной решётки β_0 и угол между призмами β_1 . Изменение угла между призмами β_1 может трактоваться как изменение угла при вершине эффективной составной призмы, поэтому общий вид и свойства поверхности $\delta\varepsilon(\beta_0, \beta_1)$ остаются такими же, как и для случая использования одной призмы. На рис. 4 представлены области углов (β_0, β_1) , в которых достигается удовлетворяющая критерию (3) коррекция неэквидистантности спектрометра для двух различных источников излучения с одинаковой относительной шириной полосы 8 % при использовании коммерчески доступных призм из оптического стекла K8 (BK7) с углом при вершине 30° .

Из рис. 3 хорошо видно, что угол падения и угол выхода излучения из составной призмы-корректора сильно отличаются от нормальных. Кроме того, эти углы близки к углу Брюстера,

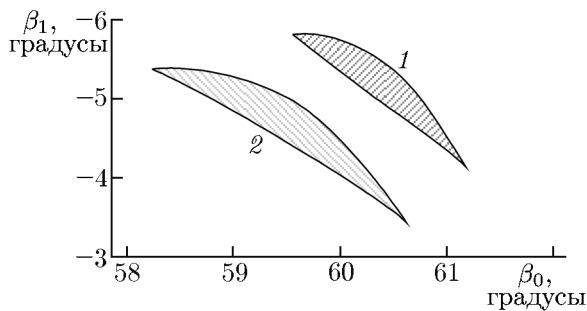


Рис. 4. Область удовлетворительной компенсации неэквидистантности по критерию (3) $\delta\epsilon < 1/(10N)$ для корректора на основе составной призмы: 1 — для центральной длины волны источника излучения $\lambda_c = 1310$ нм, 2 — для $\lambda_c = 1250$ нм

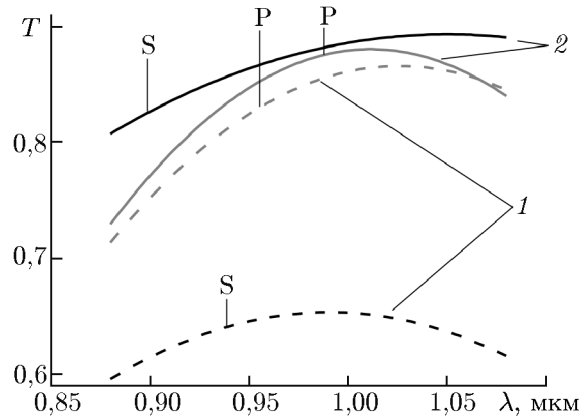


Рис. 5. Сравнительные характеристики интегрального коэффициента пропускания по интенсивности для S- и P-поляризаций в спектрометре (λ — длина волны): 1 — без просветления, 2 — с использованием просветляющих покрытий для элементов составной призмы-корректора. Рисунок построен для случая использования просветной дифракционной решётки LSFSG-1000 фирмы «LightSmyth Technologies, Inc.», США

что приводит к существенно различной эффективности пропускания для S- и P-поляризаций. Это, в совокупности с поляризационной неизотропностью эффективности дифракционной решётки, должно приводить к возникновению существенных поляризационных искажений (рис. 5, семейство кривых 1).

Учёт таких искажений при реконструкции ОКТ-изображений осуществим в интерферометрических системах, зондирующее плечо которых построено на поляризационно-удерживающих элементах либо не содержит элементов изотропной волоконной оптики. Однако использование подобных компонентов не отвечает необходимым для клинических приборов принципам гибкости (возможности настройки параметров установки в широких пределах без изменения её структуры) и универсальности (возможности работы с зондами, предназначенными для различных применений) ОКТ-системы в целом. Для выравнивания коэффициентов пропускания спектрометра для различных поляризаций были разработаны и применены просветляющие покрытия с учётом различных углов падения для различных длин волн оптического излучения. На внешние элементы составной призмы-корректора, воздушные углы падения и выхода излучения на которые составляют $48^\circ \div 67^\circ$, было нанесено шестислойное покрытие на основе тугоплавких окислов HfO_2 , Sc_2O_3 и SiO_2 . Для внутренних граней, где воздушные углы выхода и падения излучения близки к нормальному, для минимизации возможности образования артефактов, связанных с многократным отражением гранями, и уменьшения общих потерь на отражение было разработано и нанесено четырёхслойное покрытие состава HfO_2 и SiO_2 . На рис. 5 семейством кривых 2 представлены спектральные характеристики пропускания для S- и P-поляризаций в спектрометре.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

Для экспериментальной апробации использовался спектрометр, рассчитанный на работу с источником излучения с длиной волны 1060 нм. Угол падения излучения на дифракционную решёт-

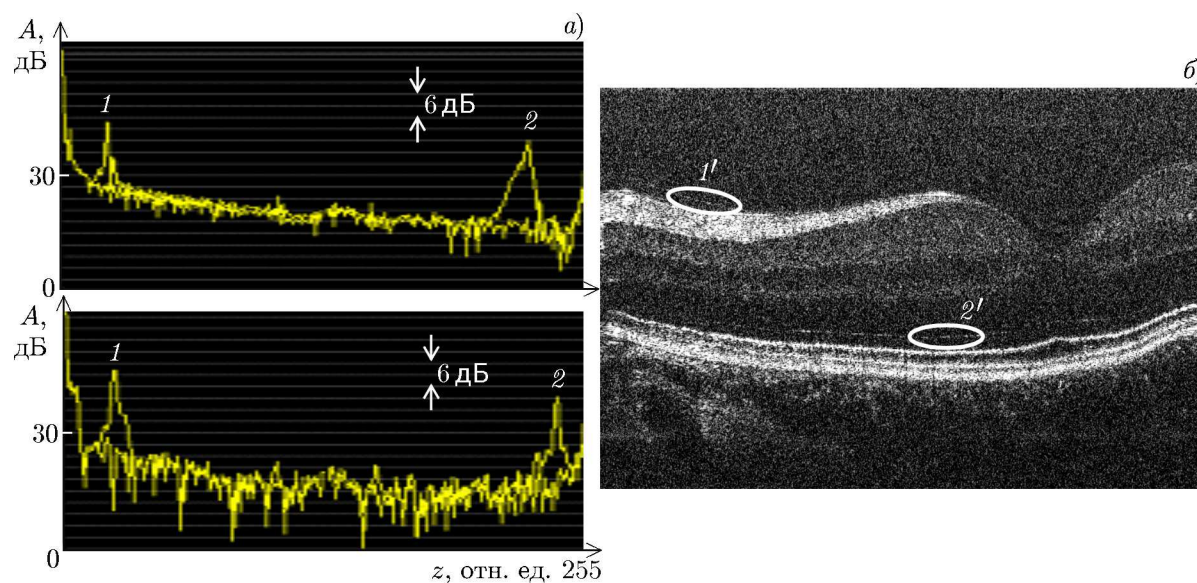


Рис. 6. Коррекция неэквидистантности в спектрометре при использовании составной призмы-корректора: восстановленные профили обратного рассеяния при использовании неоптимальной одинарной (верхняя панель) и составной (нижняя панель) призмы-корректора (а), 1 — сигнал на ближней границе наблюдаемого диапазона, 2 — сигнал на дальней границе наблюдаемого диапазона; пример изображения структуры заднего отдела глаза волонтера (б), области 1' и 2' соответствуют тонким границам в структуре

ку с частотой штриховки 1000 линий/мм (LSFSG-1000 фирмы «LightSmyth Technologies, Inc.», США) фиксирован, изготовленная для эксперимента призма из оптического стекла К8 имела угол при вершине 66° — оптимальный для построения спектра с шириной до 100 нм при центральной длине волны 1060 нм. Составной корректор неэквидистантности был изготовлен из двух призм с углом при вершине 30° , просветлённых для коррекции поляризационной анизотропии спектрометра. Центральная длина волны источника, использовавшегося в эксперименте, составляла 980 нм при дисторсии фокусирующей оптики до 0,05 % на ширине регистрируемого изображения.

На рис. 6 представлены экспериментально полученные результаты компенсации неэквидистантности спектрометра с использованием одноэлементного и составного корректора. Несмотря на то, что центральная длина волны источника, используемого в эксперименте, отличается от расчётной на 8 %, критерий (2) в экспериментальной установке выполняется для обоих компенсаторов. Однако при этом происходит существенное уширение аппаратной функции изображения при логарифмическом отображении. Из рис. 6 а хорошо видно, что профиль аппаратной функции при использовании комбинированного корректора имеет постоянную ширину по всей глубине наблюдения (пики 1 и 2), а также получается существенно более узким, чем при использовании корректора из одной призмы, угол при вершине которой отличается от оптимального.

На рис. 6б представлено изображение слоистой среды (фрагмент заднего отдела глаза человека), которое было получено при использовании составного корректора в устройстве сверхширокополосной ОКТ, построенном на источнике излучения с центральной длиной волны 980 нм и спектрометре с полосой регистрации излучения $880 \div 1080$ нм (более 20 %). В представленном изображении осуществлена коррекция влияния дисперсии на ширину аппаратной функции, дополнительной численной коррекции неэквидистантности спектрометра не проводилось. На рис. 6б можно выделить две области (1' и 2'), соответствующие тонким границам в исследуемой био-

логической структуре. Хорошо видно, что, несмотря на существенную разницу в относительной глубине этих областей, уширения аппаратной функции изображения не происходит, что является хорошим свидетельством эффективности коррекции неэквидистантности спектрометра для используемого сверхширокополосного источника излучения.

Оценка эффективности снижения вычислительной нагрузки, связанной с необходимостью осуществления программной коррекции остаточной неэквидистантности исходных данных, показывает, что, помимо исключения процедуры компенсации неэквидистантности (4-й этап вычислений), снижается сложность вычисления основных преобразований Фурье (5-й этап вычислений). Это приводит к двукратному снижению совокупной сложности вычислений, в этом случае оцениваемой как $11,6 \cdot 10^6$.

Уменьшение требуемой вычислительной мощности компьютера, управляющего спектральной ОКТ-системой, даёт возможность использования в составе ОКТ-комплекса мобильной или компактной встраиваемой вычислительной платформы. Кроме того, это обстоятельство позволяет использовать в вычислительной системе процессоры с пассивным охлаждением, что упрощает техническое обеспечение протоколов стерилизации и дезинфекции, необходимых для клинического использования ОКТ в процессе полостных или эндоскопических операций. При пассивном охлаждении внутренний объём компьютера или всего устройства ОКТ может быть полностью изолирован от внешней среды.

В то же время при использовании в составе ОКТ-системы вычислительных устройств обычной мощности освободившиеся вычислительные ресурсы можно использовать для реализации в реальном времени трёхмерной визуализации ОКТ-изображения [24] или капиллярной сосудистой сетки *in vivo* методом сравнительного анализа вариации спекловой структуры изображения [25].

Экспериментальная реализация алгоритма обработки ОКТ-изображения подтвердила оценки эффективности полностью оптической коррекции неэквидистантности спектрометра. Средняя загрузка процессора «Intel® Core™ i3-3225» (частота 3,3 МГц, 2 ядра, 4 потока, объём кэш-памяти 3 МВ) при расчёте ОКТ-изображения спектральной ОКТ-системы, использующей линейку фотоэлементов со скоростью опроса 20 000 А-сканов в секунду (SU512LD-1.7T1 фирмы «Goodrich», США), в реальном времени с программной коррекцией неэквидистантности составила около 38 %. В случае, когда программная коррекция неэквидистантности не применялась, средняя загрузка этого процессора составила около 19 %. В случае использования процессора «Intel® Core™ i3-3770» (максимальная частота 3,9 МГц, 4 ядра, 2 потока, объём кэш-памяти 8 МВ) эти величины составили $10 \div 11$ % и $5 \div 6$ % соответственно. Увеличение скорости расчётов при применении процессора «Intel® Core™ i3-3770» почти в 4 раза по сравнению с «Intel® Core™ i3-3225» объясняется большим числом ядер, повышенной тактовой частотой и большим размером кэш-буфера.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При применении в спектральной ОКТ сверхширокополосных источников зондирующего излучения обнаружилась недостаточность критерия, определяющего удовлетворительный уровень коррекции неэквидистантности спектральных отсчётов [3]. Более жёсткий критерий может быть сформулирован при учёте использования логарифмического масштаба в яркостной шкале в ОКТ-изображениях. Проведённые оценки показывают, что такой критерий может быть сформулирован в виде

$$\delta\varepsilon \leq \delta\varepsilon_{\text{cr}} = 1/(10N),$$

где $\delta\varepsilon$ — реализуемая остаточная неэквидистантность спектрометра, N — число независимо регистрируемых спектральных компонент.

Для создания спектрометра, обладающего необходимым уровнем остаточной неэквилидистантности, предложено использовать корректор, состоящий из двух идентичных призм на выходе дифракционной решётки. Регулировка дисперсионных свойств спектрометра осуществляется поворотом корректора относительно плоскости дифракционной решётки и изменением угла между элементами корректора. Добавление дополнительной степени свободы в корректоре позволяет при использовании стандартных элементов (в частности, 30°-призм) получать эффективность коррекции на уровне, предсказанном для корректора на основе одной призмы с индивидуальными параметрами. Кроме того, такой подход обеспечивает возможность гибкой настройки спектрометра для регистрации оптических спектров излучения с различными значениями центральной оптической частоты. Поляризационные искажения, обусловленные наклонным падением излучения на грани призм, могут быть скомпенсированы использованием специальных просветляющих покрытий.

Применение составного корректора неэквилидистантности позволяет вдвое снизить нагрузку на вычислительные ресурсы ОКТ-устройств. Это, в частности, даёт возможность использовать в вычислительной системе ОКТ центральный процессор с пассивным охлаждением, что упрощает техническое обеспечение протоколов стерилизации и дезинфекции, необходимых для использования ОКТ в клинических условиях.

В части проектирования и создания оптической схемы работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-02-01160-а и 15-29-03897-офи-м соответственно), в части разработки программных решений и экспериментальной апробации — в рамках проекта 0035-2014-0018 по Госзаданию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fercher A. F., Hitzinger C. K., Kamp G., et al. // Opt. Commun. 1995. V. 117, No. 1–2. P. 43.
2. Choma M. A., Sarunic M. V., Yang C. H., et al. // Opt. Express. 2003. V. 11, No. 18. P. 2183.
3. Геликонов В. М., Геликонов Г. В., Шилигин П. А. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106, № 3. С. 518.
4. Yun S. H., Tearney G. J., de Boer J. F., et al. // Opt. Express. 2003. V. 11, No. 22. P. 2953.
5. Wojtkowski M., Leitgeb R., Kowalczyk A., et al. // J. Biomedical Opt. 2002. V. 7, No. 3. P. 457.
6. Traub W. A. // J. Opt. Soc. Am. 1990. V. 7, No. 9. P. 1779.
7. Hagen N., Tkaczyk T. S. // Appl. Opt. 2011. V. 50, No. 25. P. 5023.
8. Jeon M., Kim J., Jung U., et al. // Appl. Opt. 2011. V. 50, No. 8. P. 1158.
9. Wu T., Ding Z., Wang L., et al. // Opt. Express. 2011. V. 19, No. 19. P. 18430.
10. Zhang N., Huo T., Wang C., et al. // Opt. Lett. 2012. V. 37, No. 15. P. 3075.
11. Xu D., Huang Y., Kang J. U. // Biomed. Opt. Express. 2013. V. 4, No. 9. P. 1519.
12. Bradu A., Van der Jeught S., Malchow D., et al. // SPIE Proc. 2011. V. 7889. Art no. 78892E.
13. Van der Jeught S., Bradu A., Podoleanu A. G. // J. Biomed. Opt. 2010. V. 15, No. 3. Art no. 030511.
14. Zhang K., Kang J. U. // Opt. Express. 2010. V. 18, No. 11. P. 11772.
15. Xu D., Huang Y., Kang J. U. // SPIE Proc. 2015. V. 9330. Art no. 93301B.
16. Rivet S., Maria M., Bradu A., et al. // Opt. Express. 2016. V. 24, No. 3. P. 2885.
17. Payne A., Podoleanu A. G. // SPIE Proc. 2013. V. 8571. Art no. 85712D.
18. Hu Z., Rollins A. M. // Opt. Lett. 2007. V. 32, No. 24. P. 3525.
19. Watanabe Y., Itagaki T. // J. Biomed. Opt. 2009. V. 14, No. 6. Art no. 060506.
20. Lee S.-W., Kang H., Park J. H., et al. // J. Opt. Soc. Korea. 2015. V. 19, No. 1. P. 55.
21. Gelikonov G. V., Gelikonov V. M., Shilyagin P. A. // SPIE Proc. 2008. V. 6847. Art no. 68470N.

22. Gelikonov G. V., Gelikonov V. M., Shilyagin P. A. // SPIE Proc. 2012. V. 8 213. Art no. 82133H.
23. Моисеев А. А., Геликонов Г. В., Шилягин П. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10–11. С. 727.
24. Пат. 2533055 РФ. МПК G06T 15/08, G06T 19/20. Способ оптимизации метода проекции максимальной интенсивности для визуализации скалярных трёхмерных данных в статическом режиме, в интерактивном режиме и в реальном времени / С. Ю. Ксенофонтов, Т. В. Василенкова. Заявл. 27.09.2013; Оpubл. 20.11.2014. Бюл. № 32.
25. Matveev L. A., Zaitsev V. Y., Gelikonov G. V., et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40, No. 7. P. 1 472.

Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.; принята в печать 18 сентября 2017 г.

EQUIDISTANT RECORDING OF THE SPECTRAL COMPONENTS IN ULTRA-WIDEBAND SPECTRAL OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY

*P. A. Shilyagin, S. Yu. Ksenofontov, A. A. Moiseev, D. A. Terpelov, V. A. Matkivsky, I. V. Kasatkina,
Yu. A. Mamaev, G. V. Gelikonov, and V. M. Gelikonov*

We develop an effective method for reducing non-equidistance when recording the spectral components of an interference signal in the ultra-wideband spectral optical coherent tomography. For this purpose, a corrector consisting of two identical prisms is used in a diffraction-grating spectrometer. The corrector rotation with respect to the diffraction-grating plane and the angle variation between the corrector elements allow one to adjust the equidistant spatial distribution of the spectral components in the photoreceiver array. It is experimentally proved that the developed method substitutes digital correction and leads to a significant attenuation of the computational load in the optical coherent tomography setup.