

Подавление автокорреляционных артефактов изображения в спектральной оптической когерентной томографии и многоволновой цифровой голографии

В.М.Геликонов, Г.В.Геликонов, Д.А.Терпелов, Д.В.Шабанов, П.А.Шилигин

Усовершенствован метод подавления артефактов изображения в спектральной оптической когерентной томографии (ОКТ) и многоволновой цифровой голографии, обусловленных влиянием когерентных помех, при последовательной регистрации автокорреляционной составляющей и информативного сигнала. Метод позволяет полностью подавить все типы когерентных помех при условии, что выборка значений, используемых для регистрации автокорреляционной составляющей, удовлетворяет условиям теоремы Котельникова: в спектральной ОКТ – для поперечной структуры исследуемой среды, в многоволновой цифровой голографии – длягибающей спектра перестройки источника излучения.

Ключевые слова: автокорреляционные артефакты, оптическая когерентная томография, цифровая многоволновая голография.

1. Введение

Возникновение оптической когерентной томографии (ОКТ) связывают с выходом в 1991 г. одноименной работы в журнале *Science* [1]. Технология ОКТ позиционируется как метод неинвазивного наблюдения внутренней структуры рассеивающих оптическое излучение сред, в первую очередь – биологических [2]. Наибольшее распространение ОКТ получила в офтальмологии, поскольку оказалась единственным неинвазивным способом получения изображений структуры глазного дна с разрешением в единицы-десятки микрон [3]. С возникновением спектральных методов ОКТ [4] скорость получения изображений возросла в сотни раз по сравнению с применяемым до этого корреляционным методом [1], что обусловлено более полным использованием мощности оптического излучения, рассеянного исследуемой средой в обратном направлении [5]. Однако кроме преимущества в скорости и чувствительности [5, 6] спектральный метод имеет и недостатки, одним из которых является его высокая чувствительность к наличию когерентных помех. Эти артефакты обусловлены паразитной модуляцией спектра, возникновение которой не связано с интерференцией между опорным и рассеянным в среде излучением [7, 8]. Несмотря на довольно большое число разработанных на сегодняшний момент методов борьбы с когерентными помехами [9], поиски эффективного способа их устранения продолжают до сих пор. Об этом, в частности, свидетельствуют недавние публикации [10, 11]. В многоволновой цифровой голографии, в которой для получения вы-

сокого продольного разрешения используется принцип спектральной ОКТ [12, 13], влияние когерентных помех на получаемые изображения также существенно. Очевидно, что и в многоволновой цифровой голографии, и в спектральной ОКТ задача подавления влияния когерентных помех может иметь общее решение.

В [14] был описан эффективный способ устранения артефактов ОКТ-изображения, вызванных когерентными помехами. Однако описанный метод хорошо применим только для случая, когда в промежутке между двумя и более последовательными А-сканами не происходит существенного изменения спектральной структуры излучения, рассеянного объектом исследования в обратном направлении. В приборах, основанных на ОКТ, скорость регистрации изображений обратно пропорциональна числу А-сканов, и зондирование с поперечным шагом, существенно меньшим диаметра зондирующего пучка, значительно уменьшает быстродействие системы. Таким образом, прямое применение метода, описанного в [14], представляется затруднительным. В многоволновой цифровой голографии упомянутый метод также хорошо применим только в случае шага перестройки длины волны, достаточно малого по сравнению с шириной спектральной полосы зондирующего излучения.

В настоящей работе предлагается метод выделения полезного сигнала на фоне когерентных помех при последовательной регистрации информативных и шумовых компонент сигнала в спектральной ОКТ в случае поперечного сканирования образца с шагом, сопоставимым с диаметром зондирующего пучка, и в многоволновой цифровой голографии при частотном сканировании с шагом, сопоставимым с величиной спектральных неоднородностей в спектре перестройки источника излучения.

2. Описание проблемы

Описанная в [14] методика компенсации когерентных помех заключается в раздельном измерении информативной и шумовой компонент сигнала. Шумовая компонен-

В.М.Геликонов, Г.В.Геликонов, Д.А.Терпелов, Д.В.Шабанов, П.А.Шилигин Институт прикладной физики РАН; ООО «Биомедицинские технологии», Россия 603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46 Россия; e-mail: gelikon@ufp.appl.sci-nnov.ru, paulo-s@mail.ru, terpelov@ufp.appl.sci-nnov.ru, dvshab@ufp.appl.sci-nnov.ru

та сигнала регистрируется во время выделенной экспозиции спектра на фотоприемник при модуляции длины опорного плеча измерительного интерферометра. При описанном в [14] законе модуляции это приводит к усреднению фазы интерференции между опорной и рассеянной волнами и, как следствие, к занулению кросс-корреляционной составляющей в принимаемом сигнале.

Величина выходного сигнала U отдельного фоточувствительного ПЗС-элемента пропорциональна интенсивности регистрируемого излучения. Регистрируемое отдельным фотоприемником излучение представляет собой сумму интерферирующих опорной и отраженной от объекта световых волн с волновым числом k . Формально ее можно представить как сумму трех слагаемых: полезной, или кросс-корреляционной составляющей интерференционного сигнала $U_{CC}(k)$, интенсивности спектральной компоненты (определяется суммой интенсивностей опорной волны и локально рассеянных возвращенных волн) $U_{AC}(k)$ и составляющей интенсивности, обусловленной взаимной интерференцией всей совокупности локально рассеянных волн, $U_{SCC}(k)$:

$$\begin{aligned}
 U_{CC}(k) &= 2\xi E^2(k)r \int_0^{\tau_{\text{exp}}} \int_{-\infty}^{\infty} D(z) \cos(2kz) dz dt, \\
 U_{AC}(k) &= \xi E^2(k) \int_0^{\tau_{\text{exp}}} \left[\left(\int_{-\infty}^{\infty} D(z) \exp(2ikz) dz \right)^2 + r^2 \right] dt, \\
 U_{SCC}(k) &= \xi E^2(k) \int_0^{\tau_{\text{exp}}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(z) D(z_0) \\
 &\quad \times \{ \exp[2ik(z - z_0)] - \delta(z - z_0) \} dz dz_0 dt,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где ξ – коэффициент, учитывающий емкость, квантовую эффективность и восприимчивость фотоэлемента; r – коэффициент, характеризующий отражение в опорном плече измерительного интерферометра; $E(k)$ – амплитуда электрического поля падающего на объект излучения; z – оптический путь с учетом рефракции в объекте; $D(z)$ – коэффициент, характеризующий долю излучения (по полю), возвращенную при обратном рассеянии в интерферометр с глубины z с учетом потерь. Начало отсчета по z привязано к нулевой разности хода интерферирующих волн, соответствующей положению выходного окна сканирующей системы. В дальнейшем по аналогии с предложенной в [4] терминологией сумма артефактных компонент $U_{AC}(k)$ и $U_{SCC}(k)$ будет называться автокорреляционной составляющей.

В [14] показано, что при внесении в опорную волну модуляции фазы по закону $\varphi(t) = mF(t)$ (m – амплитуда фазовой модуляции, $F(t)$ – модулирующая безразмерная функция, изменяющаяся в интервале $[-1; 1]$) возможно зануление интеграла по времени в выражении для кросс-корреляционной составляющей, которая приобретает следующий вид:

$$\bar{U}_{CC}(k) = 2\xi E^2(k)r \int_{-\infty}^{\infty} D(z) \int_0^{\tau_{\text{exp}}} [\cos(2kz + mF(t))] dt dz. \tag{2}$$

При этом артефактные составляющие $U_{AC}(k)$ и $U_{SCC}(k)$ остаются неизменными. При вычитании полученного таким образом сигнала $\bar{U}(k)$ из зарегистрированного в дру-

гой момент времени сигнала $U(k)$ автокорреляционные члены в обоих сигналах взаимно уничтожаются, оставляя только полезную кросс-корреляционную составляющую $U_{CC}(k)$. Однако необходимо отметить, что это выполняется только в том случае, если при регистрации информативной и шумовой составляющих используется один и тот же оптический тракт или одна и та же длина волны анализируемого излучения.

Наличие поперечного сканирования в случае спектральной ОКТ или перестройки длины волны излучения в многоволновой цифровой голографии делает невозможным наблюдение полезной и автокорреляционной компонент сигнала с абсолютно идентичными параметрами. В первом случае из-за поперечного сканирования при последовательной регистрации составляющих регистрируется излучение, рассеянное на различных объектах внутренней структуры. Это приводит к изменению интенсивности рассеянного излучения и продольного распределения взаимной интерференции рассеянных компонент. В результате при поперечном сканировании с помощью механических систем, инерционные свойства которых не позволяют осуществлять мгновенную по сравнению с временем экспозиции остановку и перемещение зондирующего пучка в поперечной плоскости, возникают ошибки выделения полезной составляющей. Во втором случае изменяется длина волны излучения, а с ней и общая его интенсивность. Инерционные свойства системы управления перестройкой частоты излучения приводят к затруднениям в момент мгновенной остановки перестройки частоты источника излучения.

Ниже для упрощения пересчет автокорреляционной составляющей будет приводиться для спектральной ОКТ. При формальной замене переменных результаты могут быть экстраполированы и на случай цифровой многоволновой голографии с перестройкой длины волны зондирующего излучения.

Поскольку структура исследуемого объекта в общем случае неоднородна в поперечном направлении, то величины $U(k)$ в выражении (1) зависят также и от поперечной координаты x : $U(k, x)$. Как следствие, при поперечном сканировании величины $U(k, x)$ оказываются зависящими от времени: $U(k, x(t))$. Это, в свою очередь, приводит к неполной компенсации когерентных помех при вычислении разности $U(k, x(t_1)) - \bar{U}(k, x(t_2))$. Поперечное сканирование не затрагивает компоненту $U_{AC}(k)$, поскольку параметры источника излучения и оптического тракта на временах порядка времени получения одного кадра являются неизменными. Суммарная интенсивность излучения отдельных рассеивателей изменяется несущественно ввиду их большого числа. Поперечный масштаб структуры артефактной компоненты $U_{SCC}(k, x)$, которая обусловлена взаимной интерференцией рассеянных волн, совпадает с поперечным масштабом структуры кросс-корреляционной составляющей (см. выделенный фрагмент изображения на рис.2,а). Это может приводить к неполной компенсации компоненты $U_{SCC}(k, x)$ при поперечном сканировании. В [15] влияние артефактной компоненты $U_{SCC}(k, x)$ снижается за счет уменьшения удельной мощности рассеянного излучения (увеличения мощности опорного излучения). Однако ввиду ограниченности динамического диапазона фотоприемных элементов на базе устройств ПЗС такая методика представляется неэффективной, поскольку это приводит к уменьшению отношения сигнала к шуму в системе.

3. Описание методики

Для эффективного подавления когерентных помех при поперечном сканировании предлагается использовать процедуру пересчета шумовых составляющих $\bar{U}(k, x_{AC})$ к моментам времени, соответствующим регистрации информативного сигнала $\bar{U}(k, x_{CC})$. Необходимо отметить, что во всех методах численной коррекции предъявляются требования к исходной реализации: для эффективной повторной дискретизации она должна удовлетворять условиям теоремы Котельникова. В дальнейшем предполагается, что при сканировании образца эти условия выполняются для шумовой составляющей в поперечном направлении.

Наиболее простой с точки зрения реализации и минимизации вычислительной емкости алгоритма является линейная интерполяция значений восстанавливаемой функции. Однако этот метод дает удовлетворительные результаты лишь для функций, слабо меняющихся на интервале дискретизации, что ненамного расширяет применимость описанной в [14] базовой методики.

На рис.1 представлен фрагмент поперечной структуры автокорреляционной составляющей (жирная кривая). Треугольниками условно выделены моменты регистрации автокорреляционной составляющей, кружками – кросс-корреляционной. Для иллюстрации линейной интерполяции измеренные значения автокорреляционной составляющей соединены отрезками прямых. Недостаточная эффективность использования линейной интерполяции проиллюстрирована на рис.2,б, где в выделенном сегменте изображения хорошо виден след неполностью скомпенсированной автокорреляционной составляющей $U_{SCC}(k, x)$.

Гораздо более эффективным способом с точки зрения точности восстановления недостающих значений является метод, описанный в [16]. Он основан на использовании дискретного преобразования Фурье по аргументу x исходного массива значений автокорреляционной составляющей:

$$\bar{U}(k, x_{AC}) \xrightarrow{\text{DFT}} \bar{V}(k, K). \quad (3)$$

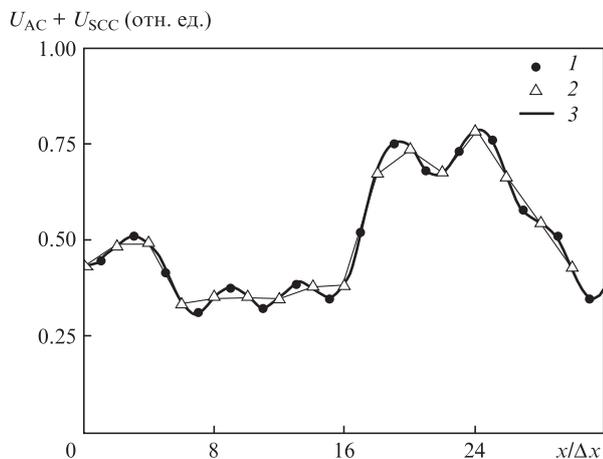


Рис.1. Фрагмент поперечной структуры автокорреляционной составляющей (1 – моменты регистрации автокорреляционной составляющей, 2 – моменты регистрации кросс-корреляционной составляющей, 3 – профиль поперечной структуры автокорреляционной составляющей).

Полученный массив значений расширяется за счет добавления нулевых элементов в области высоких пространственных частот ($K > K_{\max}$), что после использования обратного преобразования Фурье приводит к увеличению в восстановленной реализации эффективной частоты дискретизации.

При кратном увеличении числа отсчетов сохраняются отсчеты исходной реализации и вычисляются промежуточные значения; это делает метод особенно удобным в случае поочередной регистрации автокорреляционной и кросс-корреляционной составляющих.

Однако, несмотря на использование оптимизированных преобразований с потенциально относительно невысокой вычислительной емкостью, объем дополнительных вычислений при обходе изображения с размерами, характерными для ОКТ, оказывается довольно большим. Существенно уменьшить объем необходимых вычислений можно, если вместо увеличения числа отсчетов в спектральной области, последующего преобразования Фурье расширенного массива и выборки из полученной реализации промежуточных значений вычислять промежуточные значения напрямую.

Это возможно при введении в спектральную область аддитивной добавки к фазе, величина которой пропорциональна поперечной пространственной частоте ОКТ-изображения:

$$\bar{V}^+(k, K) = \bar{V}(k, K) \exp\left(i \frac{\pi}{2} \alpha \frac{K}{K_{\max}}\right). \quad (4)$$

Весовой коэффициент α определяется отношением частоты выборок автокорреляционной составляющей к частоте выборок кросс-корреляционной составляющей. При поочередной регистрации этих составляющих $\alpha = 1$. Использование обратного преобразования Фурье для полученного массива значений возвращает только промежуточные для автокорреляционной составляющей значения:

$$\bar{V}^+(k, K) \xrightarrow{\text{idFT}} \bar{U}(k, x_{CC}). \quad (5)$$

Оценки показывают, что вычислительная емкость описанного метода при большом числе отсчетов в поперечном направлении в полтора раза ниже вычислительной емкости метода, описанного в [16].

4. Экспериментальная апробация

Экспериментальная апробация описываемой методики проводилась на установке ОКТ с гибким сменным ОКТ-зондом и оптической схемой с общим для опорной и сигнальной волн оптическим путем [17] и на установке для многоволновой цифровой оптической голографии [12]. Реализация оптической схемы предполагает использование вспомогательного интерферометра Майкельсона, компенсирующего дополнительный оптический путь в измерительном интерферометре Физо, который образуется между торцом оптического волокна в дистальном конце зонда и отдельным рассеивателем в глубине исследуемой среды. Применение волоконной схемы при реализации вспомогательного интерферометра позволило осуществлять модуляцию длины опорного плеча при регистрации автокорреляционной составляющей с помощью пьезоволоконных модуляторов фазы. Использовался источник зондирующего излучения (Superlum) с центральной длиной волны 1277 нм, регистрировался спектр

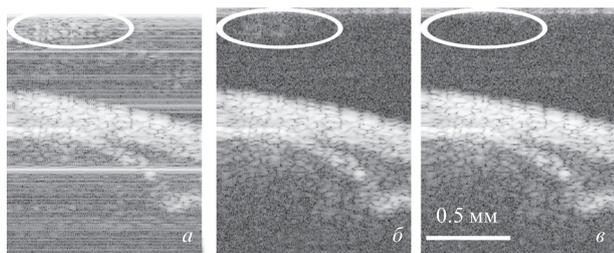


Рис.2. ОКТ-изображение полимерной пленки на сильнорассеивающей подложке в отсутствие компенсации когерентных помех (а), при компенсации когерентных помех с использованием линейной интерполяции (б) и при компенсации когерентных помех в спектральной области (в). Выделены области сильного влияния взаимной интерференции рассеянных волн.

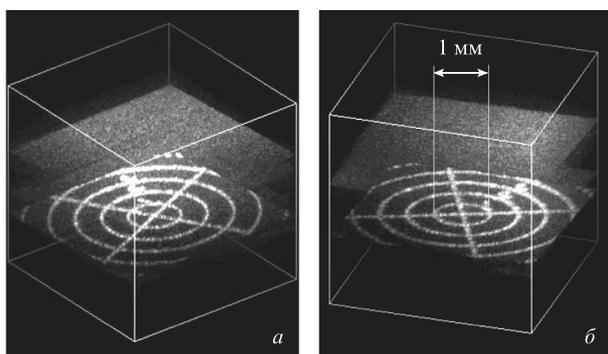


Рис.3. Ракурсы объемного изображения тестовой структуры нанесенной на стекло мишени в выделенном объеме 1 мм³ при экспонировании через матовую полимерную пленку.

излучения в пределах 100 нм. Регистрация авто- и кросс-корреляционных составляющих осуществлялась поочередно, как это показано на рис.1.

На рис.2 представлены изображения, полученные в ходе эксперимента с модельной средой – полимерной сильно рассеивающей пленкой на металлической подложке. На изображении рис.2,а когерентные помехи не скомпенсированы. Кроме постоянных в поперечном направлении артефактов, соответствующих компоненте $U_{AC}(k, x)$ и представляющих собой горизонтальные полосы, хорошо заметна компонента $U_{SCC}(k, x)$, обусловленная интерференцией между рассеянными на полимерной пленке волнами и волной, отраженной от металлической поверхности. Область значительного присутствия компоненты $U_{SCC}(k, x)$ выделена овальной рамкой. Изображение на рис.2,б получено при использовании базовой методики, описанной в [14]. В выделенном сегменте хорошо виден след недокомпенсированной составляющей $U_{SCC}(k, x)$, который в клинической практике мог бы быть истолкован как наличие рассеивающей среды. На рис.2,в представлено изображение, полученное при использовании описанной методики восстановления промежуточных значений автокорреляционной составляющей. Хорошо видно, что в выделенной области артефактное изображение отсутствует.

На рис.3 представлены различные ракурсы двумерной проекции трехмерного изображения, полученного мето-

дом цифровой многоволновой голографии. Все виды когерентных помех полностью компенсированы. Диапазон перестройки использованного в установке источника BS840-02 (Superlum) на базе узкополосного акустооптического перестраиваемого фильтра составил 825 – 875 нм.

5. Заключение

В работе предложен метод подавления когерентных помех в спектральной оптической когерентной томографии при осуществлении поперечного сканирования исследуемой среды, позволяющий полностью подавить все типы когерентных помех при условии, что выборка значений, используемых для регистрации автокорреляционной составляющей, удовлетворяет условиям теоремы Котельникова: в спектральной ОКТ – для поперечной структуры исследуемой среды, в многоволновой цифровой голографии – для огибающей спектра перестройки источника излучения. Вычислительная емкость метода в полтора раза ниже, чем метода на основе эффективного увеличения частоты дискретизации.

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.), ФЦП Минобрнауки (госконтракты от 15 марта 2010 г. № 02.740.11.0516 и от 10 февраля 2011 г. № 16.512.11.2002) и грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ (№ НШ-3800.2010.2).

- Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., Schuman J.S., Stinson W.G., Chang W., Hee M.R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C.A., Fujimoto J.G. *Science*, **254**, 1178 (1991).
- Swanson E.A., Izatt J.A., Hee M.R., Huang D., Lin C.P., Schuman J.S., Puliafito C.A., Fujimoto J.G. *Opt. Lett.*, **18**, 1864 (1993).
- Fercher A.F., Hitzenberger C.K., Drexler W., Kamp G., Sattmann H. *Am. J. Ophthalmol.*, **116**, 113 (1993).
- Fercher A.F., Hitzenberger C.K., Kamp G., Elzaiat S.Y. *Opt. Commun.*, **117**, 43 (1995).
- Choma M.A., Sarunic M.V., Yang C.H., Izatt J.A. *Opt. Express*, **11**, 2183 (2003).
- Leitgeb R., Hitzenberger C.K., Fercher A.F. *Opt. Express*, **11**, 889 (2003).
- Fercher A.F., Leitgeb R.A., Hitzenberger C.K., Sattmann H., Wojtkowski M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3564**, 173 (1999).
- Wojtkowski M., Leitgeb R., Kowalczyk A., Bajraszewski T., Fercher A.F. *J. Biomed. Opt.*, **7**, 457 (2002).
- Геликонов В.М., Касаткина И.В., Шилигин П.А. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **52**, 897 (2009).
- Moon S., Lee S.-W., Chen Z. *Opt. Express*, **18**, 24395 (2010).
- Steiner P., Meier C., Koch V.M. *Appl. Opt.*, **49**, 6917 (2010).
- Shabanov D.V., Gelikonov G.V., Gelikonov V.M., Moiseev A.A. *Proc. Digital Holography and Three-Dimensional Imaging* (Miami, Florida, 2010, DMC7).
- Kim M.K. *SPIE Rev.*, **1**, 018005 (2010).
- Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Касаткина И.В., Терпелов Д.А., Шилигин П.А. *Оптика и спектроскопия*, **106**, 1006 (2009).
- Leitgeb R.A., Wojtkowski M., in *Optical Coherence Tomography: Technology and Applications* (Berlin: Springer, 2008. p. 177).
- Зверев В.А., Стромков А.А. *Выделение сигналов из помех численными методами* (Н. Новгород: изд-е ИПФ РАН, 2001, с. 188).
- Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Шилигин П.А. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **72**, 104 (2008).