

Увеличение разрешения полнопольного оптического когерентного томографа при использовании цветного датчика изображения

А.Л.Кальянов, В.В.Лычагов, И.В.Смирнов, В.П.Рябухо

Исследовано влияние баланса белого цветного детектора изображения на разрешение полнопольного оптического когерентного томографа (ППОКТ). Проведена оценка изменения ширины интерференционного импульса в зависимости от настройки баланса белого для случаев теплового источника излучения (лампы накаливания) и белого светодиода. Показано, что посредством определенной настройки баланса белого детектора разрешающая способность ППОКТ может быть увеличена на 20% по сравнению с разрешающей способностью, достижимой при использовании монохромного детектора.

Ключевые слова: полнопольная интерферометрия, интерферометрия в белом свете, баланс белого, полнопольный оптический когерентный томограф.

1. Введение

Интерферометрия в белом свете длительное время используется (в основном в качестве метода низкокогерентной интерференционной микроскопии) для измерения микроскопического профиля поверхности и толщин тонких пленок [1, 2]. В настоящее время этот метод получил развитие и нашел применение в так называемой полнопольной томографии слоистых структур и биологических объектов [3–8]. Это стало возможным благодаря появлению высококачественных полупроводниковых матричных датчиков изображений и развитию аппаратных средств компьютерной постобработки цифровых изображений.

К основным метрологическим достоинствам систем низкокогерентной интерференционной микроскопии следует отнести высокие поперечное и продольное (осевое) пространственные разрешения. Высокое поперечное разрешение обеспечивается применением высококачественных микрообъективов с относительно большой числовой апертурой. В продольном направлении при использовании микрообъективов с относительно небольшой числовой апертурой высокое разрешение обеспечивается достаточно широким эффективным частотным спектром и, следовательно, малой длиной временной когерентности регистрируемого излучения [9–13]. При использовании микрообъективов с большой числовой апертурой при относительно нешироком частотном спектре продольное разрешение систем полнопольной томографии определяется преимущественно шириной угловой апертуры оптического поля [4, 10, 12, 14–18] и, следовательно, малой дли-

ной продольной пространственной когерентности оптического поля [19, 20]. Эффекты влияния ширины частотного спектра и ширины угловой апертуры оптических полей на продольное разрешение системы полнопольной томографии являются конкурирующими.

Ширина эффективного частотного спектра, как показано в [21], определяется совокупным влиянием всех элементов оптической системы, включая датчик изображения, на спектр излучения источника. Для источника широкополосного излучения (например, теплового источника белого света) это влияние может оказаться существенным и привести к значительному сужению результирующего спектра и, как следствие, к снижению разрешающей способности системы. Если считать идеальными с точки зрения спектральных характеристик такие элементы оптической системы, как зеркала, делители и микрообъективы, то становится важным выбор соответствующего детектора, имеющего достаточную чувствительность в широком спектральном диапазоне.

Как правило, для регистрации интерференционных сигналов в полнопольной томографии применяют монохромные матричные детекторы изображения, диапазон спектральной чувствительности которых значительно меньше ширины спектра излучения тепловых источников белого света [5, 6, 11, 22] и оказывает преимущественное влияние на ширину эффективного спектра регистрируемого излучения. В то же время форма интерференционного импульса зависит не только от ширины спектрального контура, но также и от его формы, изменением которой можно добиться определенного сужения интерференционного импульса. Это можно сделать, изменяя либо спектр излучения источника, либо спектр чувствительности детектора. Первый вариант предложен в работе [23], где в качестве источника широкополосного излучения использовался комбинированный источник, составленный из нескольких сравнительно узкополосных квазимонохроматических светоизлучающих диодов с различными центральными длинами волн излучения.

В настоящей работе показана возможность изменения эффективного спектра регистрируемого излучения путем

А.Л.Кальянов, В.В.Лычагов, И.В.Смирнов. Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского, Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83; e-mail: kalyanoval@yandex.ru
В.П.Рябухо. Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского, Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83; Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410028 Саратов, ул. Рабочая, 24

Поступила в редакцию 14 сентября 2012 г., после доработки – 12 апреля 2013 г.

управления спектральной чувствительностью детектора [24]. Для этого предполагается использовать цветной датчик изображения. Фильтры такого датчика характеризуются относительно узкой спектральной полосой пропускания, так что в каждом цветовом канале цифрового изображения формируется сравнительно широкий интерференционный импульс. Суммирование цветовых каналов приводит к существенному сужению этого импульса. В таком подходе спектры пропускания фильтров фиксированы, поэтому для получения необходимого эффективного спектра излучения следует изменять энергетическое соотношение между цветовыми компонентами в суммарном сигнале. Эта процедура известна как корректировка баланса белого. Традиционно, при использовании цветных датчиков изображения для регистрации картин интерференции в белом свете, баланс белого настраивается таким образом, чтобы добиться максимального подобия интерференционных цветов в интерференционной картине, наблюдаемой невооруженным глазом, и цветного изображения, регистрируемого камерой. Это означает, что баланс белого настроен на цветовую температуру источника, т.е. на спектр излучения источника. В этом случае на зарегистрированном изображении можно наблюдать ахроматическую интерференционную полосу нулевого порядка (белую или черную). В противном случае ахроматическая полоса отсутствует, однако ширина огибающей интерференционного импульса может оказаться меньше, чем при настройке баланса белого на цветовую температуру источника.

В настоящей работе изучено влияние настройки баланса белого на суммарный интерференционный сигнал, регистрируемый цветным датчиком изображений. Показана зависимость ширины интерференционного импульса от весовых коэффициентов цветовых каналов. Теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность повышения разрешающей способности интерференционной системы по сравнению со случаем настройки баланса белого детектора на спектр излучения источника.

2. Теория

2.1. Регистрация интерференционного сигнала цветным детектором

Эффективный спектр излучения $\tilde{S}_d(\lambda)$ может быть определен выражением [21]

$$\tilde{S}_d(\lambda) = S_d(\lambda)S_s(\lambda), \quad (1)$$

где $S_d(\lambda)$ – спектр чувствительности детектора; $S_s(\lambda)$ – спектр излучения, регистрируемого детектором; λ – длина волны.

Согласно теореме Винера–Хинчина [9] функцию временной когерентности такого излучения можно представить в виде

$$\Gamma(\Delta) \sim \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^2} \tilde{S}_d(\lambda) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\right) d\lambda, \quad (2)$$

где Δ – оптическая разность хода.

Зная спектры чувствительности $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$ и $S_B(\lambda)$ каждого цветового канала, можно записать выражение для суммарного спектра чувствительности цветного детектора:

$$S_{\text{RGB}}(\lambda) = \sum_{i=R,G,B} S_i(\lambda). \quad (3)$$

С учетом (1) и (3) выражение для суммарного эффективного спектра принимает вид

$$\tilde{S}_{\text{RGB}}(\lambda) = S_{\text{RGB}}(\lambda)S_s(\lambda) = \sum_{i=R,G,B} \tilde{S}_i(\lambda), \quad (4)$$

где $\tilde{S}_R(\lambda)$, $\tilde{S}_G(\lambda)$ и $\tilde{S}_B(\lambda)$ – эффективные спектры излучения, формирующего интерференционный сигнал в каждом цветовом канале детектора. Чтобы учесть в математической модели интерференционного сигнала возможность настройки баланса белого и, следовательно, возможность управления суммарной спектральной чувствительностью детектора, в выражения (3) и (4) следует ввести весовые коэффициенты k_i :

$$S'_{\text{RGB}}(\lambda) = \sum_{i=R,G,B} k_i S_i(\lambda), \quad (5)$$

$$\tilde{S}'_{\text{RGB}}(\lambda) = \sum_{i=R,G,B} k_i \tilde{S}_i(\lambda). \quad (6)$$

Здесь k_i – коэффициент баланса белого соответствующего цветового канала.

Из уравнений (2) и (6) следует, что функция временной когерентности излучения с суммарным эффективным спектром (6) эквивалентна взвешенной сумме функций когерентности излучения с эффективным спектром (1):

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{RGB}}(\Delta) &= \sum_{i=R,G,B} k_i \Gamma_i(\Delta) \\ &\approx \sum_{i=R,G,B} k_i \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^2} \tilde{S}_i(\lambda) \exp\left(\frac{i2\pi\Delta}{\lambda}\right) d\lambda \\ &= \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^2} \tilde{S}'_{\text{RGB}}(\lambda) \exp\left(\frac{i2\pi\Delta}{\lambda}\right) d\lambda. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис.1,*a* представлены спектры чувствительности цветовых каналов детектора с учетом спектра пропускания ИК фильтра (матрица Sony ICX413AQ, камера Nikon D100, Япония) [25], нормированные так, чтобы площади под кривыми были равны. Это означает, что вклад каждого канала в результирующий сигнал будет одинаков, а максимальная амплитуда сигнала в каждом цветовом канале будет зависеть только от спектрального состава излучения источника. На рис.1,*b* показаны смоделированные действительные части и огибающие функций когерентности эффективных излучений для каждого цветового канала, зарегистрированных таким детектором. В модели рассматривался источник излучения с равномерным спектром в диапазоне чувствительности детектора. Также на рис.1,*b* приведены суммарная функция когерентности и ее огибающая. Ширина на полувысоте огибающей функции когерентности в шкале оптической разности хода для красного канала составляет 3.7 мкм, для зеленого – 2.69 мкм, а для синего – 2.62 мкм. Ширина суммарной функции когерентности равна 1.3 мкм.

В приведенном примере вклады каждого цветового канала в суммарный сигнал равны и корректировка баланса белого не требуется ($k_R = k_G = k_B = 1$). В эксперименте сложно создать такие условия в силу неравномер-

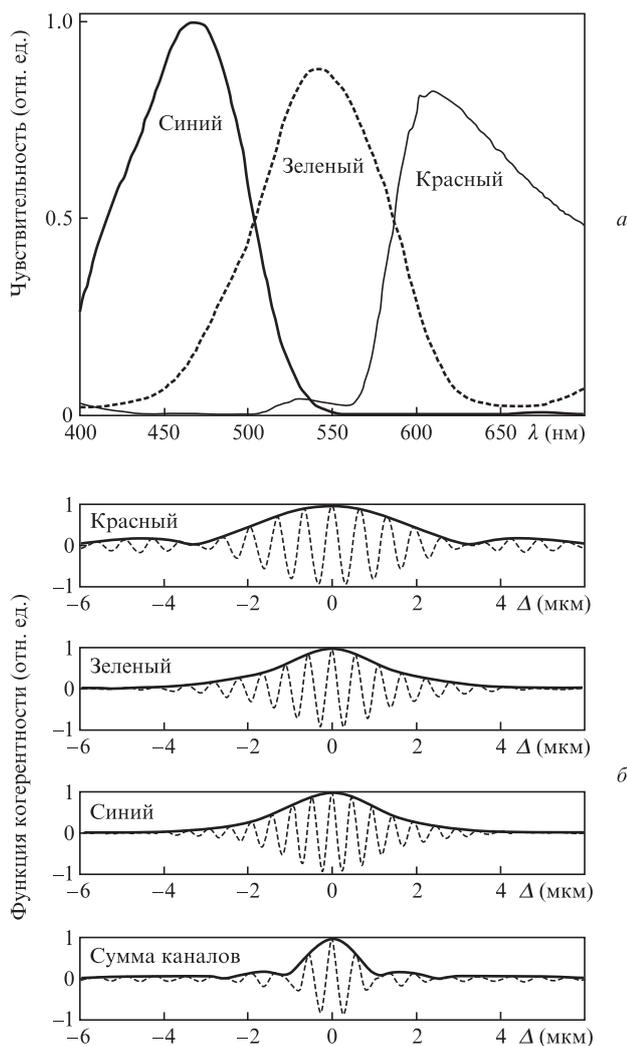


Рис.1. Спектры чувствительности цветных каналов матрицы Sony ICX413AQ (а), а также действительные части и огибающие функций когерентности источника с равномерным спектром излучения для каждого канала и для их суммы (б).

ности спектра излучения реальных источников и неравномерности спектра чувствительности полупроводниковых датчиков изображений.

На рис.2 приведены эффективные спектры излучения в каждом цветовом канале детектора при использовании в качестве источников белого светодиода и галогеновой лампы накаливания с температурой спирали 2700 К. Из соотношения амплитуд сигналов в цветовых каналах детектора видно, что для лампы накаливания преобладает красная компонента, в то время как для белого светодиода доминируют синяя и зеленая. Коррекция баланса белого заключается в избирательном усилении сигналов в отдельных каналах. Так, при использовании светодиода сигнал красного канала необходимо увеличить в 2.5 раза, а синего – в 1.1 раза (рис.2).

2.2. Пределы изменения коэффициентов баланса белого

Диапазон изменения коэффициентов баланса белого в значительной степени зависит от технической реализации этой процедуры в конкретном детекторе, а также от алгоритмов дальнейшей обработки сигнала. В настоящей работе использовались два упрощенных правила:

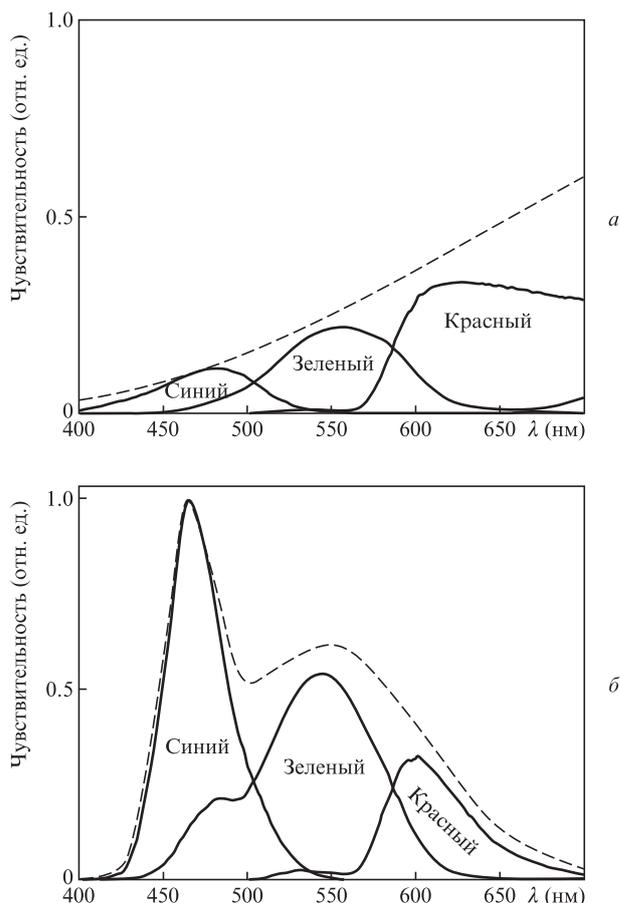


Рис.2. Спектры излучения источника (штриховые кривые) и соответствующие эффективные спектры излучения в цветовых каналах детектора (сплошные кривые) для галогеновой лампы накаливания с цветовой температурой 2700 К (а) и белого светодиода (б). Соотношения сигналов в синем, зеленом и красном каналах составляют соответственно 0.2:0.6:1.0 (а) и 0.9:1.0:0.4 (б).

1. Разрядность полезного сигнала q_{sig} должна хотя бы на единицу превышать разрядность шума q_{noise} . Как правило, шум «занимает» два-три младших разряда АЦП, для определенности можно принять $q_{noise} = 2$. Тогда данный критерий можно сформулировать следующим образом:

$$q_{sig} \geq q_{noise} + 1 = 3. \tag{8}$$

2. Максимальное значение весового коэффициента не должно превышать числа градаций уровня сигнала. Большинство современных датчиков изображения построены на базе 12-битных матриц, поэтому

$$k_{max} \leq 2^{q_{ADC} - q_{sig}} = 2^9, \tag{9}$$

где q_{ADC} – разрядность АЦП.

3. Расчет интерференционного сигнала при различных настройках баланса белого

Степень влияния настройки баланса белого детектора оценивалась по изменению ширины суммарного интерференционного импульса на полувысоте его огибающей. Согласно (7) для определенного источника излучения и определенного детектора параметры огибающей суммарной функции когерентности зависят лишь от весовых ко-

эффицентов, определяющих вклад каждого цветового канала:

$$G_s^{src}(k_R, k_G, k_B, \Delta) = k_R \Gamma_R^{src}(\Delta) + k_G \Gamma_G^{src}(\Delta) + k_B \Gamma_B^{src}(\Delta), \quad (10)$$

где $\Gamma_R^{src}(\Delta)$, $\Gamma_G^{src}(\Delta)$, $\Gamma_B^{src}(\Delta)$ – функции когерентности излучения для конкретного источника (src), определяемые эффективным спектром излучения в каждом цветовом канале.

Таким образом, ширина интерференционного импульса l^{src} для данных источника и детектора также является функцией трех переменных: $l^{src}(k_R, k_G, k_B)$, где $k_{R,G,B} \in [1, 2^9]$, как следует из условия (9).

Поскольку графическое представление функции трех переменных затруднительно, целесообразно перейти к функции двух переменных. Для этого можно ввести вектор $k' = (k'_R, k'_G = 1, k'_B)$, связанный с вектором $k = (k_R, k_G, k_B)$ следующим соотношением:

$$k' = \frac{k}{k_G}. \quad (11)$$

В этом случае из условия (9) для вектора k' следует, что

$$\max(k') = \frac{\max(k)}{\min(k)} \leq 2^{q_{ADC} - q_{sig}} = 2^9, \quad (12)$$

где $\max(k)$ и $\min(k)$ – максимальное и минимальное значения весовых коэффициентов соответственно.

Учитывая условия (8) и (12), для весовых коэффициентов можно записать соотношения

$$\begin{aligned} \log_2 k'_{R,B} &\in [-9; 9], \\ \log_2 k'_G &= 0, \\ \log_2 |k'_R - k'_B| &\leq 9. \end{aligned} \quad (13)$$

Согласно (13) ширина интерференционного импульса может быть представлена как функция двух переменных – $l^{src}(k'_R, k'_G = 1, k'_B)$, и при этом будут охвачены все допустимые значения весовых коэффициентов.

На рис.3,а показана зависимость полуширины интерференционного импульса l^{2700} от настройки баланса белого детектора. В качестве источника использовалась лампа накаливания с температурой спирали 2700 К. Треугольниками показаны значения логарифмов компонент вектора k' ($k'_R, k'_G = 1, k'_B$), соответствующие настройке баланса белого на цветовой температуры источника в диапазоне 1600–20000 К, квадратом – значения логарифмов компонент k'_{wd} , соответствующие балансу белого, настроенному на излучение светодиода, кружком – значения логарифмов компонент k'_{min} , при которых достигается минимальная ширина интерференционного импульса $l_{min}^{2700}(k'_R = 2^{5.6}, k'_G = 1, k'_B = 2^{7.8}) = 1.12$ мкм. На рис.3,б приведены модули и действительные части суммарной функции когерентности излучения теплового источника с цве-

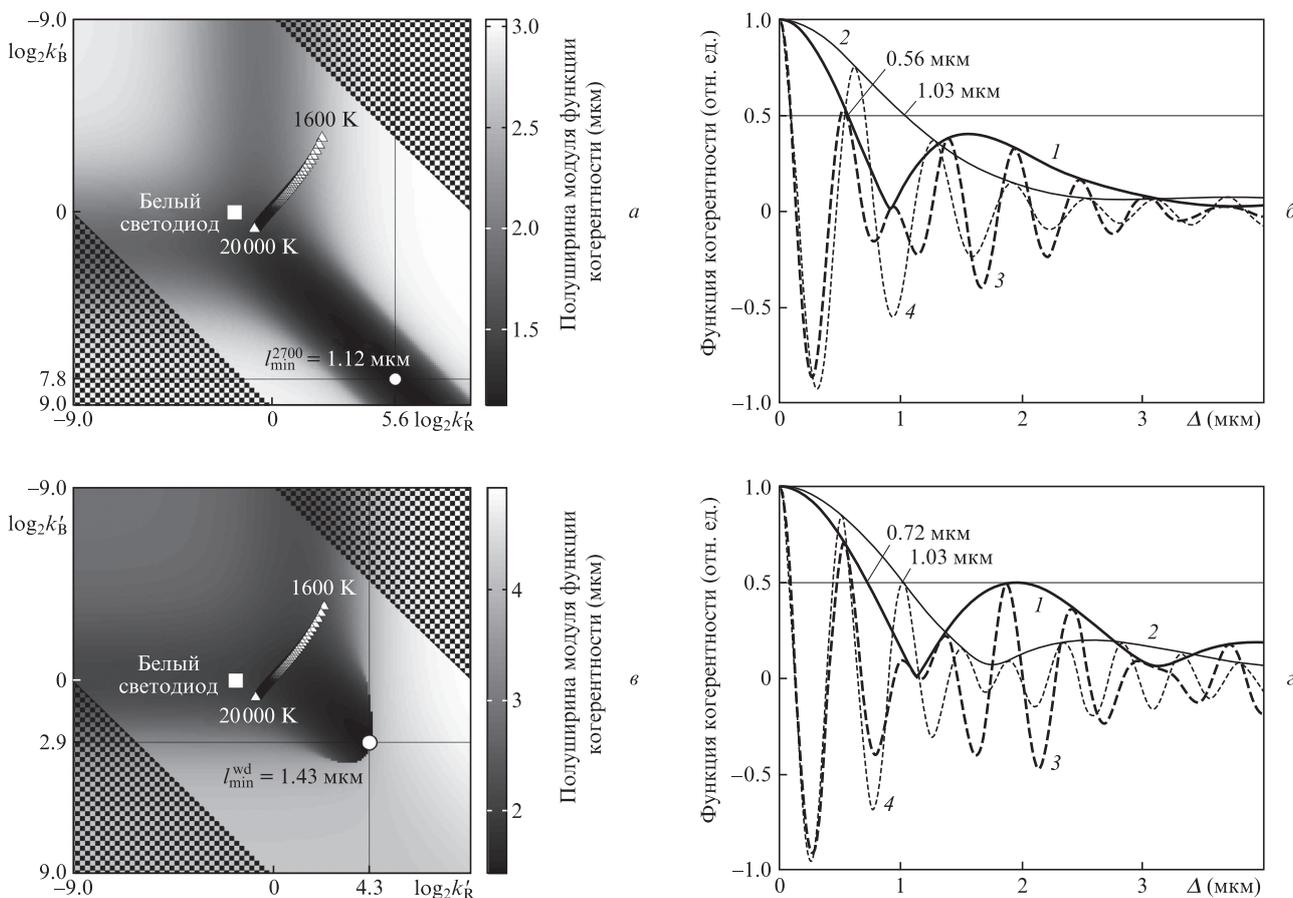


Рис.3. Зависимости полуширины модуля функции когерентности от настройки баланса белого детектора при использовании теплового источника излучения с цветовой температурой 2700 К (а) и белого светодиода (б), а также модули (1, 2) и действительные части (3, 4) суммарной функции когерентности излучения теплового источника с цветовой температурой 2700 К (б) и белого светодиода (з). Кривые 1, 3 соответствуют минимальной ширине импульса, кривые 2, 4 – ширине импульса при настройке баланса белого на спектр излучения источника.

Табл.1. Ширины (на половине высоты) интерференционных импульсов для различных источников излучения и детекторов.

Источник излучения	Ширина интерференционного импульса			$\log_2 k'_R$, $\log_2 k'_G$, $\log_2 k'_B$
	l_{\min} (мкм)	l_{source} (мкм)	l_{mono} (мкм)	
Лампа накаливания (2000 К)	1.14	2.49 (54%)	1.45 (21%)	4.4, 0, 8.0
Лампа накаливания (2700 К)	1.12	2.05 (45%)	1.31 (14%)	5.6, 0, 7.8
Лампа накаливания (3200 К)	1.12	1.89 (41%)	1.00 (-11%)	6.1, 0, 7.6
Белый светодиод	1.44	2.03 (29%)	1.82 (21%)	4.3, 0, 2.9

товой температурой 2700 К. На рис.3,б показана зависимость полуширины интерференционного импульса l_{wd} от настройки баланса белого детектора при использовании в качестве источника излучения белого светодиода, а на рис.3,з представлены модули и действительные части соответствующих суммарных функций когерентности. В этом случае минимальная ширина импульса $l_{\min}^{\text{wd}} (k'_R = 2^{4.3}, k'_G = 1, k'_B = 2^{2.9}) = 1.43$ мкм.

Приведенные результаты демонстрируют влияние баланса белого цветного детектора изображения на форму и ширину интерференционного импульса и, как следствие, на разрешающую способность интерференционной системы. Как показано на рис.3,а, б, для галогеновой лампы подбором весовых коэффициентов цветовых каналов можно добиться уменьшения ширины интерференционного импульса на 45% (от 2.05 до 1.12 мкм) по сравнению с шириной импульса l_{2700}^{2700} при настройке баланса белого на спектр источника излучения. Для белого светодиода (рис.3,в, з) можно добиться уменьшения ширины импульса на 29% (от 2.05 до 1.44 мкм).

В табл.1 приведены ширины огибающей функции когерентности излучения различных источников при регистрации интерференционного сигнала цветным ($l_{\min}, l_{\text{source}}$) датчиком изображения Sony ICX413AQ, а также монохромным (l_{mono}) детектором Sony ICX204AL (камера DCU223M Thorlabs). Значения l_{\min} соответствуют минимальной ширине интерференционного импульса, достигнутой путем настройки баланса белого детектора, а значения l_{source} – ширине импульса при настройке баланса белого на спектр излучения источника. В скобках указано сужение интерференционного импульса в процентах.

Монохромный детектор Sony ICX204AL чувствителен в спектральном диапазоне 400–1000 нм, который существенно шире диапазона чувствительности цветного детектора Sony ICX413AQ (400–700 нм), ограниченного ИК фильтром. Однако, согласно данным табл.1, использование цветного детектора изображения позволяет увеличить разрешающую способность интерферометра в белом свете даже по сравнению с таковой для монохромного детектора.

4. Экспериментальные результаты

Для проверки приведенных выше теоретических положений нами проведен эксперимент по изменению ширины интерференционного импульса путем настройки баланса белого цветного детектора. В качестве детектора использовалась цифровая фотокамера камера Nikon D100 (Nikon, Япония). Данные сохранялись и обрабатывались в 12-битном RAW-формате.

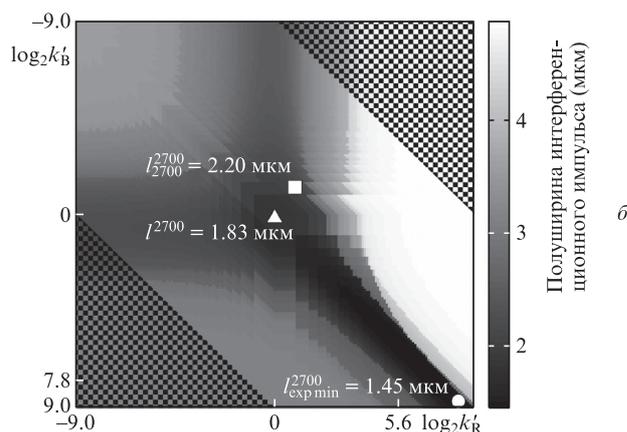
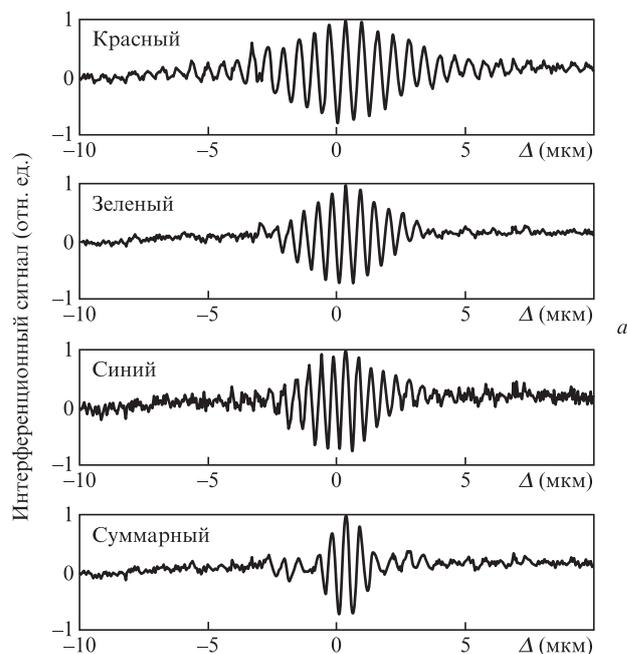


Рис.4. Нормированные интерференционные импульсы, зарегистрированные в каждом цветовом канале детектора Sony ICX413AQ, и суммарный импульс (а), а также зависимость полуширины интерференционного импульса на полувысоте от настройки баланса белого детектора (б). Источник света – лампа накаливания (2700 К).

Для формирования интерференционной картины применялся микроинтерферометр Линника МИИ-4, в котором источником света служила лампа накаливания с цветовой температурой 2700 К. В объектном плече интерферометра было установлено зеркало. На рис.4,а представлены нормированные интерференционные импульсы, зарегистрированные в каждом цветовом канале детектора.

Настройка баланса белого и вычисление суммарного интерференционного импульса выполнялись согласно выражению (10) с учетом (11) и (12). На рис.4,б приведена зависимость полуширины интерференционного импульса от настройки баланса белого.

Несмотря на некоторое несоответствие теоретических и экспериментальных данных, полученные результаты наглядно демонстрируют уменьшение ширины интерференционного импульса в результате настройки баланса белого детектора от 1.83 мкм (точка (0.0; 0.0) – треугольник на рис.4,б) до 1.45 мкм (точка (8.6; 9.0) – кружок на рис.4,б), что составляет 21%. Сужение импульса оказывается еще бо-

лее значительным, чем в случае сигнала, настроенного на баланс белого источника. В этом случае ширина интерференционного сигнала составляет 2.20 мкм (точка (1; -1.4) – квадрат на рис.4,б) и сужение импульса достигает 34%.

5. Обсуждение и заключение

В низкокогерентной интерференционной микроскопии – полнопольной томографической микроскопии – продольное разрешение определяется шириной формируемого интерференционного импульса, которая в случае применения микрообъективов с относительно небольшой числовой апертурой обратно пропорциональна ширине эффективного спектра излучения, образующего интерференционный сигнал. В отличие от интерференционных методов, в которых используется лазерное излучение, при использовании белого света на эффективный спектр значительное влияние оказывает спектр чувствительности детектора интерференционного сигнала. Распространенные в настоящее время кремниевые монохромные детекторы изображения позволяют реализовать метод полнопольной интерферометрии в белом свете, обеспечивая продольное разрешение 1–2 мкм.

Применение именно монохромных детекторов продиктовано стремлением максимально увеличить ширину эффективного спектра. В то же время это накладывает высокие требования на оптические компоненты интерференционной системы, такие как линзы, объективы и делители, поскольку необходимо обеспечивать их спектральную прозрачность во всем частотном диапазоне чувствительности детектора.

В данной работе теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность формирования интерференционного импульса с шириной, сравнимой с таковой при использовании монохромного детектора, в полнопольном интерферометре в белом свете с применением цветного кремниевого детектора путем изменения настройки баланса белого. Предложенный подход позволяет увеличить разрешающую способность интерферометра, не меняя при этом источника излучения.

Сравнение функции когерентности с огибающей минимальной ширины, достижимой за счет настройки баланса белого, с интерференционными импульсами, зарегистрированными монохромным детектором и цветным детектором с настройкой баланса белого на излучение источника, показало возможность увеличения разрешающей способности прибора в обоих случаях (табл.1). Кроме того, применение цветного детектора изображения позволяет использовать вдвое меньший спектральный диапазон по сравнению с таковым в случае монохромного детектора, что снижает требования к оптическим элементам интерферометра.

Результаты моделирования были подтверждены в эксперименте. Некоторое отличие измеренных данных от полученных в результате моделирования мы связываем, в первую очередь, с возможным различием эффективных спектров источников, используемых в эксперименте и в модели, поскольку допускаем наличие неучтенного влияния на эффективный спектр излучения оптических эле-

ментов интерферометра [26]. Еще одной причиной некоторого расхождения результатов теории и эксперимента может быть ошибочная оценка допустимых пределов изменения весовых коэффициентов, которые были определены в предположении, что контраст интерференционной картины равен единице, чего не наблюдалось в эксперименте (на рис.4 представлены нормированные интерференционные импульсы). В действительности контраст варьировался для различных цветовых каналов в диапазоне 0.4–0.6.

Несмотря на указанные выше расхождения, проведенный эксперимент качественно подтвердил возможность изменения ширины интерференционного импульса в полнопольной низкокогерентной интерферометрии с помощью настройки баланса белого цветного детектора изображения.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашения № 14.В37.21.0728 и 14.В37.21.0563), гранта РФФИ № 12-02-31204/12 и гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ № НШ-1177.2012.2.

1. Линник В.П. *ДАН СССР*, **1**, 18 (1933).
2. Deck L., de Groot P. *Appl. Opt.*, **33** (31), 7334 (1994).
3. Beaurepaire E., Voccaro A.C., Lebec M., Blanchot L., Saint-Jalmes H. *Opt. Lett.*, **23** (4), 244 (1998).
4. Dubois A., Vabre L., Voccaro A.C., Beaurepaire E. *Appl. Opt.*, **41** (4), 805 (2002).
5. Grieve K., Dubois A., Simonutti M., Paques M., Sahel J., Gargasson J., Voccaro C. *Opt. Express*, **13** (16), 6286 (2005).
6. Latrive A., Voccaro C. *Biomed. Opt. Express*, **2** (10), 2897 (2011).
7. De Lega X., de Groot P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6995**, 69950P (2008).
8. Binding J., Arous J., Léger J., Gigan S., Voccaro C., Bourdieu L. *Opt. Express*, **19** (6), 4833 (2011).
9. Мандель Л., Вольф Э. *Оптическая когерентность и квантовая оптика* (М.: Физматлит, 2000, с. 896).
10. Dubois A., Grieve K., Moneron G., Lecaque R., Vabre L., Voccaro C. *Appl. Opt.*, **43** (14), 2874 (2004).
11. De Groot P., de Lega X. *Appl. Opt.*, **43** (25), 4821 (2004).
12. Abdulhalim I. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **8** (11), 952 (2006).
13. Sacchet D., Moreau J., Georges P., Dubois A. *Opt. Express*, **16** (24), 19434 (2008).
14. Dubois A., Voccaro A.C., in *Optical Coherence Tomography. Technology and Applications* (Berlin: Springer, 2008, p. 565).
15. Zeylikovich I. *Appl. Opt.*, **47** (12), 2171 (2008).
16. Safrani A., Abdulhalim I. *Appl. Opt.*, **50** (18), 3021 (2011).
17. Safrani A., Abdulhalim I. *Opt. Lett.*, **37** (4), 458 (2012).
18. Abdulhalim I. *Ann. Phys.*, **524** (12), 787 (2012).
19. Рябухо В.П., Лякин Д.В., Лычагов В.В. *Оптика и спектроскопия*, **107** (2), 296 (2009).
20. Ryabukho V.P., Lyakin D.V., Grebenyuk A.A., Klykov S.S. *J. Opt.*, **15** (2), 025405 (2013).
21. Lychagov V.V., Ryabukho V.P., Kalyanov A.L., Smirnov I.V. *J. Opt.*, **14** (1), 015702 (2012).
22. Dubois A., Moreau J., Voccaro C. *Opt. Express*, **16** (21), 17082 (2008).
23. Pakula A., Salbut L., in *Fringe 2009, 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology* (Berlin: Springer-Verlag, 2009, pp 358–363).
24. Kalyanov A.L., Lychagov V.V., Ryabukho V.P., Smirnov I.V. *J. Opt.*, **14** (12), 125708 (2012).
25. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/222935/SONY/ICX413AQ.html>.
26. Кальянов А.Л., Лычагов В.В., Смирнов И.В., Рябухо В.П. *Изв. СГУ. Сер. Физика*, **11** (2), 19 (2011).