

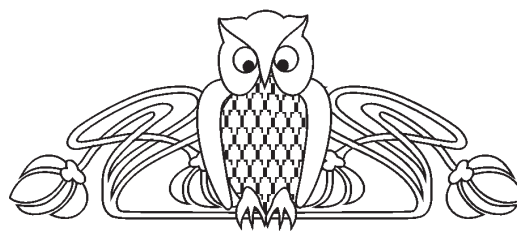


УДК 535.412: 535.417: 681.723.26

ПРОЯВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МОНОХРОМНОГО ДЕТЕКТОРА В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

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

Саратовский государственный университет
E-mail: kalyanoval@yandex.ru



В работе рассмотрено влияние спектральных характеристик монохромного детектора изображения на спектр регистрируемого излучения в низкокогерентном микроинтерферометре полного поля. Показана зависимость формы интерференционного импульса и периода осцилляций в сигнале от спектра чувствительности детектора. Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных измерений спектральных характеристик микроинтерферометра Линника с применением монохромного детектора изображения и теплового источника света.

Ключевые слова: когерентность, низкокогерентная интерферометрия, полнопольная интерферометрия, интерференционная микроскопия.

Effect of Spectral Properties of Image Sensor on Interference Experiment

A. L. Kalyanov, V. V. Lychagov,
I. V. Smirnov, V. P. Ryabukho

Influence of spectral properties of monochrome image sensor on spectrum of detecting radiation in full-field low-coherence microinterferometer is investigated. Dependence of interference pulse shape and period of interference fringes on the spectrum is shown. Simulated results and experimental measurements of integral transmission spectrum of Linnik microinterferometer with the silicon monochrome image sensor and thermal light source are presented.

Key words: coherence, low-coherence interferometry, full-field interferometry, interference microscopy.

Введение

В последнее время матричные детекторы изображения получили широкое распространение в методах интерференционного контроля и изучения поверхности и внутренней структуры объектов технического и биологического происхождения [1,2]. Благодаря возросшему быстродействию и уменьшению стоимости стало возможным построение интерференционных систем на основе монохромных или цветных цифровых датчиков изображения.

Вместе с тем исследование внутренней структуры сложных биологических объектов микро- и наномасштаба средствами оптической интерферометрии накладывает существенные ограничения на когерентные свойства излуче-

ния, используемого для зондирования объекта [1,2]. Продольное пространственное разрешение интерференционной системы определяется шириной интерференционного импульса, которая в большинстве практически значимых случаев совпадает с длиной временной когерентности. Две неоднородности, расстояние между которыми меньше длины временной когерентности, не будут разрешаться системой. Использование широкополосных источников света позволяет сузить интерференционный импульс и увеличить разрешающую способность интерферометра [3–6].

В работах [7–9] показано, что взаимодействие источника излучения и детектора, различных элементов оптической схемы, а также спектральные свойства самого объекта могут приводить к значительному искажению спектра излучения, участвующего в формировании регистрируемой интерференционной картины, что в значительной степени влияет на форму и ширину функции когерентности.

В данной работе проведены исследования влияния спектральных свойств элементов интерферометрической системы и детектора изображения на форму интерференционного импульса. Исследования выполнялись на базе микроинтерферометра Линника МИИ-4. Для регистрации сигнала использовалась цифровая монохромная камера Thorlabs DCU223M на базе ПЗС-матрицы Sony ICX204AL с предустановленным ИК фильтром Thorlabs FGB37, тепловой источник излучения – лампа накаливания для системы освещения микроскопа 8 В, 28 Вт. Для установления теоретического соответствия между спектральными и корреляционными свойствами оптических полей, измеренными экспериментально, или рассчитанными, использовалась теорема Винера–Хинчина.

Теоретический расчет спектра излучения в низкокогерентной интерференционной системе

Спектральная чувствительность наиболее распространенных кремниевых полупроводни-



ковых датчиков изображения матричного типа, изготовленных по технологии ПЗС или КМОП, лежит в области от 400 до 1000 нм и зависит от технологии изготовления и легирующих элементов, а максимум чувствительности может варьироваться от сине-зеленой до ближней ИК области спектра. Спектр излучения, участвующего в формировании детектируемой интерференционной картины, определяется формой кривой спектральной чувствительности и существенно отличается от спектра излучения источника.

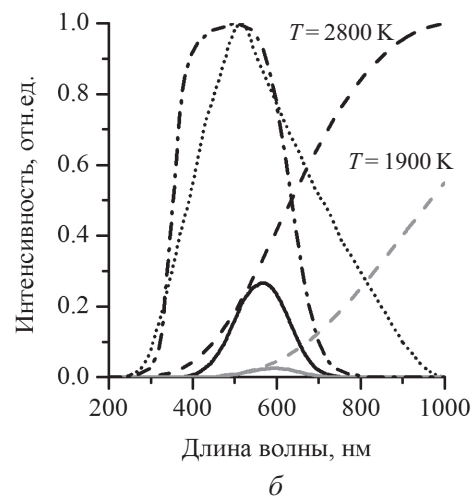
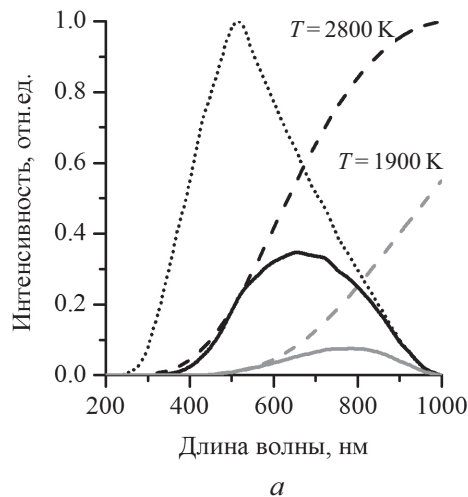


Рис. 1. Спектр чувствительности кремниевого матричного датчика изображения Sony ICX204AL по данным производителя (пунктир), спектр пропускания ИК фильтра, установленного в камере Thorlabs DCU223M (штрихпунктирная линия), спектры излучения теплового источника при температурах 2800 К и 1900 К (штриховые линии) и соответствующие им результирующие спектры (сплошные линии): без ИК фильтра (а) и с ИК фильтром (б)

Графики, представленные на рис. 1, а показывают существенное отличие эффективного спектра как от спектра источника, так и от спектра чувствительности детектора. В случае цветовой температуры источника 2800 К центральная длина волны эффективного спектра $\lambda_0 = 650$ нм, а ширина спектрального контура на полувысоте $\Delta\lambda = 360$ нм. В случае цветовой температуры 1900 К λ_0 возрастает до 780 нм, а $\Delta\lambda$ уменьшает до 300 нм. Сужение спектрального контура излучения приводит к увеличению длины временной когерентности и соответственно снижению разрешающей способности интерферометрической системы.

В используемой камере Thorlabs DCU223M установлен ИК фильтр марки Thorlabs FGB37, экспериментально измеренный спектр пропускания которого изображен на рис. 1, б штрихпунктирной линией.

Использование ИК фильтра приводит к дополнительному сужению эффективного спектра. Центральные длины волн составляют 570 нм при цветовой температуре 2800 и 600 нм при 1900 К,

На рис. 1, а штрихом показаны спектры излучения абсолютно черного тела при температуре 2800 К (черный) и 1900 К (серый), пунктиром показан спектр чувствительности ПЗС-матрицы Sony ICX204AL без ИК фильтра по данным производителя. Сплошными линиями показаны рассчитанные эффективные спектры излучения при различных температурах, полученные путем произведения значений спектров излучения источника и спектров чувствительности детектора.

ширина спектра 170 нм и 150 нм соответственно (см. рис. 1, б). Следует отметить, что в этом случае смещение центральной длины волны спектра излучения менее выражено. Если в отсутствие ИК фильтра смещение спектра может быть оценено в величину ≈ 130 нм (см. рис. 1, а), то для случая на рис. 1, б смещение составляет только ≈ 30 нм. Кроме того, при сравнении рис. 1, а и 1, б становится очевидно, что использование ИК фильтра приводит к дополнительному смещению спектров в коротковолновую область по сравнению с матрицей без фильтра. Величина этого смещения составила ≈ 80 нм и ≈ 180 нм для источников с температурой 2800 и 1900 К соответственно. Отношение ширины спектра к центральной длине волны при этом изменилось с 0.61 до 0.35 для источника с температурой 2800 К и с 0.44 до 0.29 для источника с температурой 1900 К.

Обсуждаемые выше эффективные спектры излучения источника рассчитаны исходя из наличия экспериментально измеренных спектров излучения теплового источника, чувствительно-



сти камеры, пропускания ИК фильтра. Согласно теореме Винера–Хинчина [10,11] в соответствие каждому из этих спектров на рис. 1 можно поставить функцию когерентности оптического поля, имеющего данный эффективный спектр времен-

ных частот. На рис. 2 приведены действительные части и модули нормированных функций когерентности для четырех рассматриваемых комбинаций источников излучения (с температурой 1900 К и 2800 К) и детекторов (с ИК фильтром и без него).

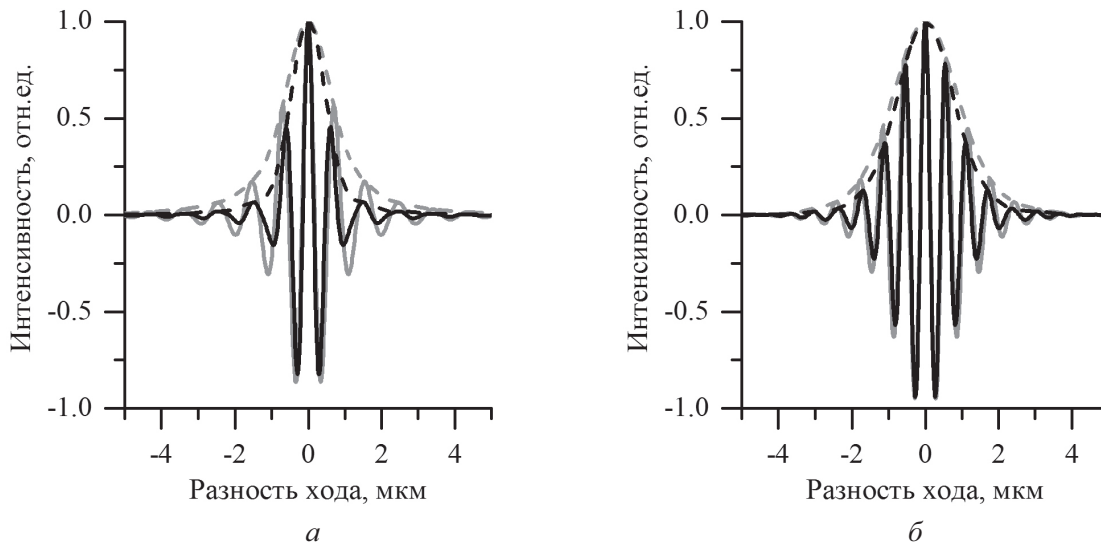


Рис. 2. Нормированная функция когерентности (выделена серым) и ее модуль (выделен черным) для источника с температурой 2800 К (сплошная линия) и 1900 К (пунктир) при использовании в качестве детектора кремниевого матричного датчика изображения Sony ICX204AL без ИК фильтра (а) и с ИК фильтром (б)

Функцию временной когерентности в методах интерференционной микроскопии и томографии можно рассматривать как импульсный отклик системы на единичное воздействие, в качестве которого выступает какая-либо неоднородность или граница слоя, на которой происходит рассеяние или отражение доли энергии освещающего излучения. Приведенные на рис. 2 графики могут быть расценены как такого рода интерференционный сигнал. Выводы, сделанные ранее на основе выявленных закономерностей изменения эффективного спектра источника, подтверждаются видом этих графиков. Преимущественное влияние заключается в уширении интерференционного импульса и изменении периода интерференционной осцилляции.

Экспериментальные измерения эффективного спектра излучения

В ходе проведенных экспериментов была решена обратная задача определения эффективного спектра по интерференционному сигналу. В качестве источника излучения использовалась лампа накаливания с источником тока, калиброванным на цветовую температуру 1900 К и 2800 К.

На рис. 3 представлены интерференционные импульсы и их огибающие для цветовой температуры излучения источника 1900 К (рис. 3, а) и

2800 К (рис. 3, б), полученные с помощью микроинтерферометра Линника.

Интерференционный импульс, измеренный в эксперименте, шире теоретического, содержит большее число осцилляций. Полуширина импульса при 2800 К составляет 1.1 мкм, при 1900 К – 1.2 мкм. При этом различия двух импульсов для разных температур источника значительно меньше предполагаемых. Такое несоответствие с теорией свидетельствует о несовпадении рассчитанного и реального эффективных спектров. По полученной интерферограмме был восстановлен эффективный спектр излучения, участвующего в формировании интерференционного сигнала. На рис. 3, в представлены эффективный спектр источника излучения при цветовой температуре 1900 К и использовании ПЗС-камеры без ИК фильтра и спектр, рассчитанный на основе интерференционного импульса, а на рис. 3, г – соответствующие спектры для температуры источника 2800 К. Значительное несовпадение спектров в ИК области связано со спектральными свойствами элементов оптической схемы микроинтерферометра МИИ-4, оптимизированных для работы в видимой области спектра. Результирующие спектры уже расчетных и слабо зависят от цветовой температуры источника.

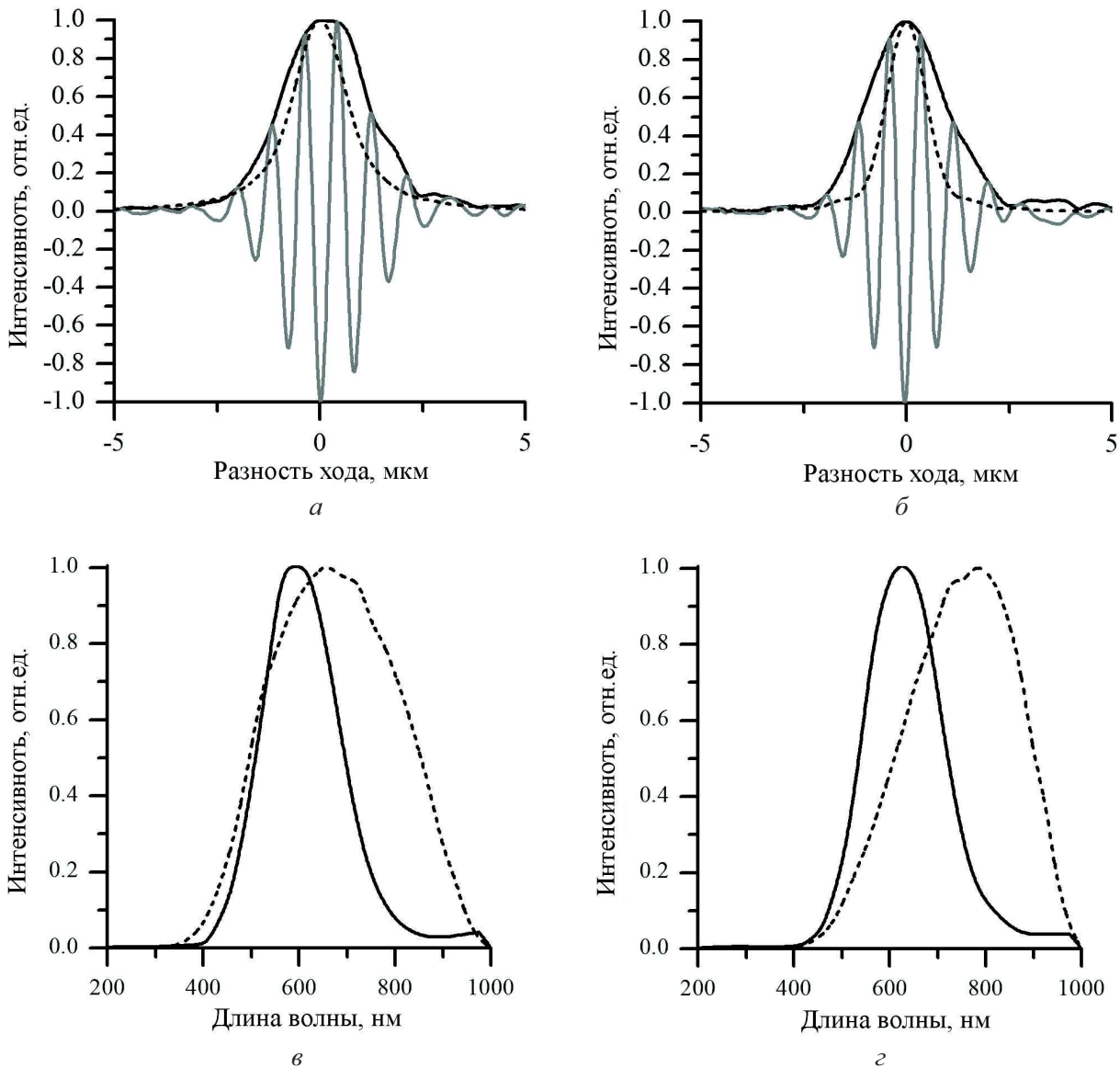


Рис. 3. Нормированный интерференционный импульс (серый) и его огибающая (черный), измеренные экспериментально (сплошная линия) и рассчитанные из спектра (пунктир) при использовании детектора изображения Sony ICX204AL без ИК фильтра для источника с температурой 1900 К (а) и 2800 К (б); эффективные спектры, рассчитанные на основании спектральных характеристик источника и детектора (пунктир) и восстановленные из интерференционного импульса (сплошная линия) при использовании ПЗС-камеры без ИК фильтра: 1900 К (в) и 2800 К (г)

Максимум эффективного спектра приходится на 595 нм для 2800 К, ширина спектра составляет 245 нм. Центральная длина волны смещена на 60 нм в коротковолновую область по сравнению со спектром, рассчитанным теоретически. Для 1900 К максимум приходится на длину волны 625 нм. При этом ширина составляет 240 нм. В этом случае несоответствие спектров более значительное, центральная длина волны смещена на 160 нм.

На рис. 4, а и 4, б представлены интерференционные импульсы и их огибающие, полученные на микроинтерферометре Линника при температуре источника 1900 К и 2800 К соот-

ветственно, зарегистрированные ПЗС-камерой Thorlabs DCU223M с поставляемым в комплекте ИК фильтром. Полуширина импульсов при 2800 К и 1900 К одинакова и составляет 1 мкм. Также на рис. 4, а и 4, б показаны интерференционные импульсы, смоделированные на основании рассчитанных эффективных спектров.

Видно, что измеренные в эксперименте и рассчитанные теоретически интерференционные импульсы близки по форме и ширине, совпадают по количеству осцилляций, что означает схожесть эффективных спектров. Можно ожидать, что спектр, рассчитанный теоретически, немного

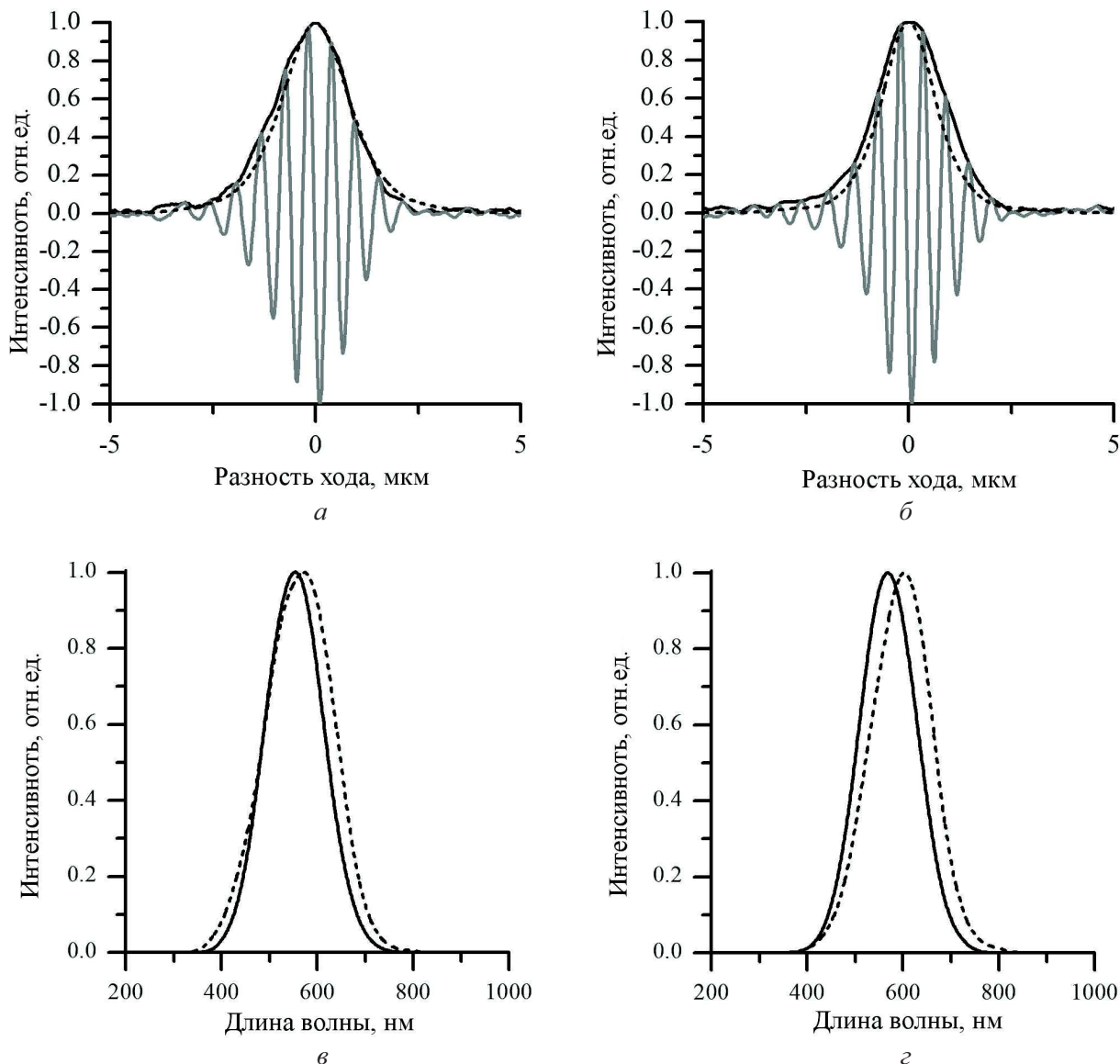


Рис. 4. Нормированный интерференционный импульс (серый) и его огибающая (черный) измеренные экспериментально (сплошная линия) и рассчитанные из спектра (пунктир) при использовании детектора изображения Sony ICX204AL с ИК фильтром для источника с температурой 1900 К (а) и 2800 К (б); эффективные спектры, рассчитанные на основании спектров излучения лампы накаливания и чувствительности датчика изображения (пунктир) и восстановленные из интерференционного импульса (сплошная линия) при использовании ПЗС-камеры с ИК фильтром: 1900 К (в) и 2800 К (г)

шире реального. На рис. 4, в представлены эффективный спектр источника излучения при цветовой температуре 1900 К и использовании ПЗС-камеры с ИК фильтром и спектр, рассчитанный на основе интерференционного импульса, а на рис. 4, г – соответствующие спектры для температуры источника 2800 К. Центральные длины волн составляют 570 нм и 555 нм соответственно, а ширины совпадают и равны 140 нм.

Сравнение графиков, приведённых на рис. 3–4 позволяет сделать вывод о значительном влиянии спектральных свойств оптической системы МИИ-4 на интерференционный сигнал. Кроме

того, проявляется влияние ИК фильтра, ограничивающего результирующий спектр в длинноволновой области. Эти факторы увеличивают ширину интерференционного импульса, регистрируемого системой, и уменьшают потенциальную разрешающую способность.

Выводы

Установлено совместное влияние спектра излучения источника и спектра чувствительности приемника при регистрации интерференционного сигнала в высокоразрешающих интерференционных системах, используемых для изучения



внутренней структуры объектов как технического, так и биологического происхождения. Эффекты, связанные с этим, проявляются, главным образом, при интерферометрии в белом свете, и в значительной степени влияют на разрешающую способность интерференционных систем [4–9].

Широкое распространение матричных детекторов изображения и их применение в интерферометрических исследованиях делает необходимым учет оптических и конструктивных особенностей таких детекторов при обработке интерферограмм [1,2,7]. В рамках данной работы описано влияние, которое матричный монохроматический датчик изображения оказывает на интерференционный сигнал. Продемонстрирован способ оценки разрешающей способности системы на основе данных о спектральных свойствах входящих в нее компонент.

Представленные результаты демонстрируют эффективность применения предложенной методики расчета результирующего спектра для задач интерферометрии объектов биологического и технического происхождения и показывают зависимость интерференционного сигнала от спектральных свойств источника освещения, детектора изображения и оптической системы.

Исследования проведены при финансовой поддержке Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)» и НТП ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственные контракты № 02.740.11.0879, 02.740.11.0770).

УДК 53.047

ДИНАМИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ

Д. Э. Постнов, Р. Н. Корешков, О. В. Семьякина-Глушковская

Саратовский государственный университет

E-mail: postnov@info.sgu.ru

E-mail: glushkovskaya@mail.ru

Работа посвящена анализу динамических и спектральных характеристик сигнала, отражающего быстрые изменения скорости распространения пульсовой волны (СРПВ). Приведены характеристики отклика сигнала СРПВ в высокочастотном НФ диапазоне (от 0.1 до 0.5 Гц), описано модельное представление гипотезы о природе этих колебаний.

Ключевые слова: сосудистый тонус, скорость распространения пульсовой волны.

Список литературы

1. Optical coherence tomography : technology and applications / eds. W. Drexler, J. G. Fujimoto. New York : Springer, 2008. 1330 p.
2. Torok P., Kao F.-J. Techniques and Advanced Systems // Optical Imaging and Microscopy. New York : Springer Berlin Heidelberg, 2007. 499 p.
3. Rosen J., Takeda M. Longitudinal spatial coherence applied for surface profilometry // Appl. Opt. 2000. Vol. 39, № 23. P. 4107–4111.
4. Рябухо В. П., Кальянов А. Л., Лычагов В. В., Лякин Д. В. Влияние ширины контура частотного спектра на поперечную когерентность оптического поля // Опт. и спектр. 2010. Т. 108, № 6. С. 979–984.
5. Рябухо В. П., Лякин Д. В., Лычагов В. В. Продольная когерентность оптического поля протяженного пространственно некогерентного источника // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 2. С. 175–184.
6. Рябухо В. П., Лякин Д. В., Лычагов В. В. Длина продольной когерентности оптического поля // Опт. и спектр. 2009. Т. 107, № 2. С. 296–301.
7. Ohmi M., Haruna M. Ultra-high resolution optical coherence tomography (oct) using a halogen lamp as the light source // Opt. Review. 2003. Vol. 10, № 5. P. 478–481.
8. Brundavanam M. M., Viswanathan N. K., Rao D. N. Effect of input spectrum on the spectral switch characteristics in a white-light Michelson interferometer // J. Opt. Soc. Amer. 2009. Vol. 26, № 12. P. 2592–2599.
9. Bajraszewski T., Wojtkowski M., Szkulmowski M., Szkulmowska A., Huber R., Kowalczyk A. Improved spectral optical coherence tomography using optical frequency comb // Opt. Exp. 2008. Vol. 16, № 6. P. 4163–4176.
10. Борн Э., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973. 760 с.
11. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М., 2000. 896 с.



Dynamic and Spectral Characteristics of Time Series Describing Pulse Wave Velocity

D. E. Postnov, R. N. Koreshkov,
O. V. Semyachkina-Glushkovskaya

We analyze the dynamic and spectral characteristics of the signals that reflects the rapid changes in pulse wave velocity (PWW). We