УДК 620.179.118.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.Е. Махов¹, А.И. Потапов², Я.Г. Смородинский^{3,4}, Е.Я. Маневич^{5,*}

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Россия 197198 Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13 ²Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2 ³ИФМ УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

⁵3АО «Эскомстроймонтаж-сервис», Россия 199178 Санкт-Петербург, 17 линия, 54, корп. 4, литер А E-mail: *manevich@es-servis.com

> Поступила в редакцию 11.03.2019; после доработки 27.05.2019 Принята к публикации 07.06.2019

Рассмотрены вопросы расширения диапазона измерения формы и определения деформации поверхности методами регистрации волновых фронтов, таких как голографическая, спекл-интерферометрия и спекл-фотография на базе двухлучевого интерферометра Жамена, имеющего устройство сдвига изображений. Разработана конструкция двухлучевого интерферометра с устройством сдвига изображений в каналах на базе синхронно наклоняемых плоскопараллельных пластинок. Дано описание методики обработки сдвиговых интерферограмм. Проведено исследование точности измерения периода полос в картине интерференции алгоритмами на базе методов преобразования Фурье и вейвлет-анализа. Разработана структурная схема автоматизированного устройства расшифровки спекл-интерферограмм фазовым методом на базе Не—Ne-лазера в магнитном поле с зеемановским сдвигом частоты. Показано, что точность измерения периода полос интерференции достигает 0,02 интерференционной полосы.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, спекл-интерферометрия, световое поле, интерферометр Жамена, National Instruments, виртуальный прибор, непрерывное вейвлет-преобразование, НВП, сдвиг оптической частоты, эффект Доплера, эффект Зеемана.

DOI: 10.1134/S0130308219080086

введение

Методы голографической и спекл-интерферометрии основаны на сравнении отраженных от поверхности или проходящих через исследуемый объект волновых фронтов в разные моменты времени. Они имеют достаточно высокую чувствительность к смещениям областей поверхности контролируемого изделия, однако достаточно узкий диапазон измерения [1], что затрудняет их практическое использования в широком круге задач механико-прочностного контроля изделий, особенно в тех случаях, когда исследуемый объект претерпевает постоянное смещение между состояниями (экспозициями двух контролируемых состояний). На практике методы голографической интерферометрии имеют более высокую чувствительность к деформации поверхности и более высокие требования к механической стабильности системы контроля, в то время как методы спекл-интерферометрии и спекл-фотографии более низкую чувствительность к смещениям точек поверхности и более низкие требования к механической стабильности системы контроля. При этом волновой фронт может быть зарегистрирован регистратором высокого разрешения, что требует второй стадии проведения контроля — расшифровки полученных интерферограмм, которая может быть реализована с использованием матричными фотоприемниками сравнительно невысокого разрешения. Очевидно, что на этой стадии можно автоматизировать процесс получения и обработки информации.

Следует отметить, что в последнее время появился новый метод регистрации волновых фронтов цифровыми камерами (ЦК) светового поля (СП) [2], основанный на четырехмерном кодировании хода всех лучей от исследуемых объектов. Программная обработка файла СП позволяет учитывать изменение угла визирования ЦК, выделять яркостные пространственные двухмерные слои [3]. Корреляция слоев пространства по ее глубине также позволяет определять форму и рельеф поверхности [4, 5]. Очевидно, что диапазон контролируемых параметров формы поверхности в этом случае будет ограничен конфигурацией оптической схемы и параметрами ЦК СП. В случае смещения объекта контроля во времени также появляются проблемы сравнения волновых фронтов. Частично проблема может быть решена на стадии цифровой обработки кадров СП.

Проведенный анализ показывает, что в оптических схемах, основанных на регистрации волновых фронтов, существует проблема малого диапазона измерения контролируемых параметров формы и деформаций поверхности.

СДВИГОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Одна из возможностей расширить диапазон измерения значений компонент вектора смещений деформируемой поверхности на стадии расшифровки голографических, спекл-интерферограмм и спекл-фотографий связана с использованием высокоточных многоканальных оптических систем (например, на базе двухлучевых интерферометров со сдвигом изображения) или смещением исходных волновых фронтов в своих каналах. По сути, этот подход сводится к смещению восстановленных волновых фронтов. Для системы регистрации волновых фронтов по принципу регистрации светового поля это приводит к смещению координат лучей, сохраняя направления их распространения.

Физические принципы данного подхода проиллюстрированы на схеме, приведенной на рис.1, где на примере двухэкспозиционной спеклограммы (спекл-фотографии), полученной на квадратичном регистраторе (фотопластинке), рассмотрена интерференция волн, соответствующих разным точкам поверхности.



Рис. 1. Схема интерференции волн, прошедших через участки спеклограммы, соответствующие разным точкам поверхности.

Две выбранные пары точек на квадратичном регистраторе $P: (A_1 \, \text{u} \, A_2) \, \text{u} \, (B_1 \, \text{u} \, B_2)$ соответствуют двум зарегистрированным состояниям поверхности контролируемого объекта. В обычной схеме оптической когерентной обработки интерферограммы [1] (например, тонким лучом лазера) период полос интерференции, формируемых парами волн, прошедших через идентичные участки, может оказаться либо слишком большим (меньше апертуры дифрагированных лучей), либо слишком маленьким (сопоставимый со спекл-шумом). Это исключает возможность непосредственного определения периода полос интерференции, например, путем денситометрических исследований плотности квадратического регистратора (фотопластинки) или распределения освещенности, регистрируемой матричным фотоприемником. При использовании двухлучевой сдвиговой оптической системы происходит сдвиг пар волн, соответствующих точкам (A'1, A'2 и B'1, B'2 — в первом канале; А", А" и В", В" — во втором канале) с заданным постоянным смещением. Можно получить такое смещение пар волн, когда период полос интерференции между волнами, соответствующими точками в первом и втором каналах интерферометра $(A''_1, A'_2 u B''_1, B'_1)$ будет находиться в измеря-емом диапазоне периода интерференционных полос. При этом в плоскости регистрации картины интерференции в двух выбранных ее областях x_A и x_B (\hat{T}_A , T_B) будут наблюдаться несколько систем интерференционных полос. Отметим, что период полос интерференции должен превышать размер спекл структуры, определяемой апертурой освещающего луча лазера.

Известно, что характерный размер спеклов, вызванный когерентным освещением равен [1]:

$$b_s = 1,22 \cdot \frac{\lambda \cdot z}{D},\tag{1}$$

где *z* — расстояние от спеклограммы до плоскости наблюдения, *D* — апертура луча.

Сдвиг волн следует выбрать таким образом, чтобы период полос интерференции волн, соответствующих другим очкам (A'_1, A''_2 и B'_1, B''_1), был намного меньше и не разрешался регистратором. При этом, найденная разница в периоде полос интерференции в областях $A(x_A)$ и $B(x_B)$ определяет искомую деформацию поверхности контролируемого изделия на расстоянии $\Delta x = x_A - x_B$.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка принципов построения устройства двухканального интерферометрического прибора со сдвигом изображений в каналах и методики определения деформации поверхности в широком диапазоне смещений и деформации поверхности исследуемых объектов. Проведение исследований по расшифровке сдвиговых интерферограмм различными алгоритмами, определение достижимой точности измерения периода для полос интерференции. Разработка общей структурной схемы автоматизированного устройства определения деформаций на основе сдвигового интерферометра, двухчастотного лазера и метода фазовых измерений периода полос интерференции.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Анализ известных схем двухлучевых интерферометров показывает, что наиболее подходящим для практической реализации сдвиговой интерферометрии является интерферометр Жамена (рис. 2a), со схемой сдвига волн, реализованный на базе устройства синхронно наклоняемых плоскопараллельных пластинок (рис. 2δ). Для повышения чувствительности и точности наклона пластин использован дифференциальный винт (рис. 2e). Конструкция узла наклона пластин дает возможность реализовать необходимый диапазон смещений волн в каналах интерферометра, точно устанавливать заданные смещения и получать минимальную погрешность воспроизведения заданных смещений, а также имеет приемлемые требования к точности изготовления механических и оптических деталей узла смещений волн.

Плоскопараллельная пластинка устройства сдвига волн создает продольный Δ и поперечный δ сдвиг лучей [3] в зависимости от ее толщины *d* и угла наклона ω :

$$\delta = \sin \omega \cdot \left(1 - \frac{\cos \omega}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \omega}} \right) \cdot d; \qquad \Delta = \left(1 - \frac{\cos \omega}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \omega}} \right) \cdot d. \tag{2}$$

В качестве высокоточного устройства наклона разработана конструкция дифференциальной винтовой пары (см. рис. 2*в*).



Рис. 2. Интерферометр Жамена с устройством сдвига волн:

— конструкция интерферометра Жамена; б — устройство оптического сдвига волн; в — дифференциальная винтовая пара наклона плоскопараллельных пластинок.



Рис. 3. Конструктивные параметры пластины интерферометра Жамена.

Наклон каждой пластинки устройства сдвига определяется углом поворота головки винта α , шагом резьб 1-го (h_1) и 2-го винта (h_2):

$$\omega = \arcsin\left(\frac{h_2 - h_1}{2\pi}\alpha\right). \tag{3}$$

Максимальную чувствительность смещения лучей к углу повороту винта можно достичь при минимальной разнице шагов резьбы винтовой дифференциальной пары. В разработанной конструкции дифференциальной винтовой пары использовались

стандартные шаги резьбы (см. рис. 2в) $\Delta h = h_2 - h_1 = 0.5 \text{ мм}(h_2) - 0.35 \text{ мм}(h_1) = 0.15 \text{ мм},$ что создает смещение волн на единицу толщины пластинки $\Delta/\delta = 0.33$ на один поворот головки винта.

Габаритные размеры конструктивных элементов интерферометра Жамена (плоскопараллельных пластин 1 и 2) следует выбирать из условия обеспечения необходимой угловой апертуры в системе расшифровки интерферограмм, а также возможности размещения устройства оптического сдвига волн в оптических каналах интерферометра. При этом необходимо учитывать то, что для получения максимально возможного сдвига изображений необходимо максимально разнести осевые лучи каналов интерферометра, что, в свою очередь, связано с увеличением толщины пластин интерферометра 1 и 2. Следует учитывать, что увеличение толщины пластин интерферометра снижает его температурную стабильность. Оптическое устройство сдвига волн реализовано на синхронно наклоняемых плоскопараллельных пластинках. Несинхронность наклона пластин 3 и 4 и разьюстировка устройства сдвига приводит к продольному сдвигу интерферирующих волн, что приводит к уменьшению динамического диапазона измерений смещений поверхности.

Исходя из перечисленных соображений, были предложены оптимальные геометрические параметры оптической схемы интерферометра Жамена, совмещенного с устройством сдвига волн, геометрических размеров пластин интерферометра (рис. 3) и (рис. 2*a*, масштаб 1:2,5) соответственно. Оптико-механическое устройство сдвига волн обеспечивало достаточную эффективность работы прибора с различными интерферограммами, включая сдвиговые. Сдвига волн при этом мог составлять от сотых долей миллиметров до миллиметра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для данного интерферометра сдвига были проведены расшифровки спекл-фотографий (пластинка регистрации между экспозицииями сдвигалась на небольшую постоянную величину, порядка 0,2—0,6 мм) деформируемой плоской поверхности тонким лучом лазера. Результаты расшифровки показали возможность получения достаточно качественных интерферограмм при использовании описанной выше методики (рис. 4).



Рис. 4. Интерферограмма, полученная интерферометром со сдвигом интерферирующих волн.



Рис. 5. Фрагмент лицевой панели ВП для исследования интерферограмм: *а* — регистрируемая картина интерференции; *б* — спекл-структура; *в* — спектр Фурье интерферограммы (увеличено).

Основным вопросом всех методов интерферометрии является точность определения периода полос интерференции [1]. В большинстве случаев точность определения периода полос интерференции в автоматизированном режиме считывания не превышает 0,2 периода полосы. Одним из путей к повышению точности автоматизированного контроля в интерферометрии является разработка алгоритмов на базе различных математических методов обработки изображений и получения информации, таких как спектральный анализ пространственной структуры картины интерференции (Фурье, обобщенный частотно-временной) [6, 7], вейвлет-анализ [8].

Для решения данной задачи использовалась регистрация спеклограммы цифровой камерой (ЦК) с матричным фотоприемником (КМОП, ПЗС-матрица) с последующим вводом изображения картин полос в компьютер, ее анализ специальным виртуальным прибором (ВП), созданным в среде разработки приложений NI LabVIEW [9] с модулем технического зрения NI IMAQ-Vision [10]. Лицевая панель ВП для исследования интерферограмм представлена на рис. 5. На экранах (рис. 5*a*) показаны синтезированные картина интерференции в условиях спекл-шума и отдельно картина спекл-шума (рис. 5*б*).

Фрагмент блок-диаграммы измерительного виртуального прибора, осуществляющее двумерное преобразование Фурье картины интерференции, представлен на рис. 6.



Рис. 6. Фрагмент блок-диаграммы ВП анализа интерферограмм методом преобразования сигналов Фурье.

Период полос интерференции можно определять, использовав различные алгоритмы обработки изображений, например, непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) распределения освещенности [11, 12], что позволяет осуществить фильтрацию спекл-шума с одной стороны, с другой — использовать систему регистрации в условиях механической нестабильности системы контроля [13].

Основные ограничения в измерении периода полос интерференции связаны с наличием когерентного спекл-шума [1], определяемого как результат взаимной интерференции световых волн со случайными амплитудами и фазами. Алгоритм НВП позволяет осуществить фильтрацию когерентного шума (спекл-структуры) в интерферограмме [14]. Параметры функции преобразования Фурье (FFT.vi) или непрерывного вейвлет-преобразования (WA Continuous Wavelet Transform.vi) подбираются индивидуально для каждой ЦК с матричным приемником и параметров спекл-шума. Точность определения периода (T_{χ} , T_{γ}) по основным пространственным частотам (максимумам кривых НВП) в этом случае оказывалась не хуже 0,05 интерференционной полосы, угловой пространственной ориентации полос интерференции — не хуже 0,02.

Как известно, другой путь повышения точности определения периода интерференционных полос заключается в использовании фазовых измерений сигналов (например, гетеродинная голографическая интерферометрия [15, 16], гетеродинная спекл-интерферометрия [17]), которые требуют наличия двух пучков лучей лазера, частоты которых сдвинуты на небольшую величину, лежащую в радиодиапазоне. Известны различные методы такого сдвига оптической частоты: вращающиеся фазовые решетки, вращающаяся дифракционная решетка [18], другие устройства, использующие эффекта Доплера, эффект Зеемана в газовом лазере [19]. Для фазовых измерений в ряде случаев желательно также иметь пучки лучей со сдвинутыми частотами, которые различимы по некоторому признаку, например, поляризации. Использование описанного выше двухлучевого интерферометра со сдвигом волн можно совместить с использованием устройства сдвига оптической частоты или разделения пучков лучей с различными оптическими частотами. Причем сдвиг оптической частоты луча можно реализовать как в одном из каналов интерферометра, так и при разделении лучей уже со сдвинутыми частотами, например, по типу поляризации. В результате такого сочетания сдвиговой интерферометрии и фазового метода становится возможным построить эффективные схемы автоматизированных измерений периода полос интерференции в более широком динамическом диапазоне определения деформаций.

Для циркулярной поляризации луча лазера, для малого сдвига оптической частоты в один из каналов интерферометра можно поместить вращающуюся фазовую пластинку (во второй канал помещается такая же неподвижная пластинка). Сдвиг частоты также можно реализовать, поместив в один из каналов интерферометра линейно перемещающуюся или вращающуюся дифракционную решетку. Возможен также способ внешнего сдвига оптической частоты двух циркулярно поляризованных пучков внутри резонатора гелий-неонового лазера, с последующим их разделением по каналам интерферометра [6].

Сдвиг оптической частоты при помощи механического перемещения оптических элементов заведомо приводит к снижению надежности конструкции прибора, сдвиг при помощи электрооптического модулятора [20] имеет малую угловую апертуру и экономически нецелесообразен. Более интересен способ получения сдвига частоты в трубке газового лазера с внутренним резонатором при наложении продольного магнитного поля (эффект Зеемана), хотя, как показывают исследования, для такой системы требуется система стабилизации частоты сдвига.

Оптическая схема устройства для автоматизированной расшифровки спекл-интерферограмм фазовым методом, использующим Не—Ne-лазер с зеемановским сдвигом частоты, представлена на рис. 7.



Рис. 7. Схема устройства фазового контроля сигналов со сдвигом частот в Не-Ne-лазере.

Полная автоматизация процесса контроля деформаций поверхности в устройстве на рис. 7 достигается за счет использования компьютерных технологий на базе решений фирмы National Instruments. Продольное магнитное поле от соленоида 3 в трубке гелий-неонового лазера I дает на выходе лазера два циркулярно поляризованных пучка лучей со сдвинутой оптической частотой. Пучок лучей разделяется призмой 5 на опорный пучок и рабочий. Биение частоты опорного луча (сдвиг частоты) регистрируется фотоприемником 7. Рабочий луч проходит через спеклограмму 9 и интерферометр 11, 12 с устройством оптического сдвига волн 13. Динамическая картина интерференции регистрируется двумя фотоприемниками 14, 15, разнесенными на величину примерно кратную периоду полос картины интерференции. Сигналы с фотоприемника опорного канала 7 и фотоприемников измерительного канала 14, 15 вводятся через плату DAQ 16 в компьютер 17, работающего под управлением виртуального прибора 18. Виртуальный прибор содержит регулируемый источник питания катушки 3, который производит подстройку сдвига оптической частоты. Виртуальный прибор также управляет перемещением спеклограммы (сканирование) посредством вывода логического шаблона управления шаговым двигателем на цифровые линии платы DAQ. Вся система ввода/вывода информации может быть реализована на одной универсально плате сбора данных фирмы National Instruments, например PCI 6014.

Использование ЦК светового поля может решить вопрос неопределенности плоскости локализации полос интерференции, оно может быть актуальным с точки зрения автоматизации процесса измерения, в том числе в управляемых роботизированных системах станков с ЧПУ [21].

Альтернативные, более простые методы определения полос интерференции по их изображениям, регистрируемых ЦК, имеют более узкий диапазон измерения, однако проще в реализации. Для интерференции, полученной в интерферометром с устройством сдвига волн, требуется калибровка устройства сдвига изображений.

выводы

Таким образом, сдвиговая интерферометрия эффективно может использоваться в спеклфотографии совместно как с алгоритмами спектрального анализа или вейвлет-анализа (непрерывное вейвлет-преобразование) распределения освещенности в изображении картины интерференции, так и совместно с фазовыми методами определения периода динамической интерференционной картины. Метод позволяет компенсировать поступательное перемещение объекта при анализе ее деформаций. При этом погрешность определения периода полос интерференции в том и другом случае при определенной конфигурации измерительной схемы может быть достигнута примерно одинаковая — до 0,02 интерференционной полосы. Данный метод в принципе можно использовать в голографической и корреляционной спекл-интерферометрии. Для изучения возможностей практического использования предложенного метода в голографической и корреляционной спеклинтерферометрии необходимы дальнейшие исследования.

Использование спектрального анализа более предпочтительно в случае, когда заранее неизвестна ориентация полос интерференции, вейвлет-анализ предпочтителен в случае, когда на качество картины интерференции влияют ряд трудно учитываемых факторов, в то время как фазовые методы измерений сигналов позволяют более эффективно усреднять пространственно-временное воздействие спекл-шума.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.

2. *Махов В., Потапов А., Закутаев А.* Принципы работы цифровых камер светового поля с массивом микролинз // Компоненты и технологии. 2018. № 1 (198). С. 14—20.

3. *Maxos E.M. Потапов А.И., Maxos B.E.* Прикладная оптика / Учеб. пособие. СПб.: СЗТУ, 2004. 348 с. 4. *Kučera Jan.* Computational photography of light-field camera and application to panoramic photography. Department of Software and Computer Science Education Supervisor of the master thesis: Ing. Filip Šroubek, Ph.D. Study programme: Computer Science, Software Systems Specialization: Computer Graphics. Prague 2014. 98 p.

5. *Makhov V.E., Sytko I.I.* Shape and Relief Evaluation Using the Light Field Camera / В сборнике: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. V. 194. 2018. С. 022020.

6. *Bracewell R.N.* The Fourier transform and its applications. McGraw-Hill Science/Engineering/Math. 3 ed. 1999. 640 p.

7. *Махов В., Лиференко В., Закутаев А.* Методы частотно-временного анализа сигналов и их компьютерная реализация в LabVIEW // Компоненты и технологии. 2016. № 7 (180). С. 137—142.

8. *Махов В*. Использование непрерывного вейвлет-преобразования в интерферометрии // Компоненты и технологии. 2015. № 11 (172). С. 132—136.

9. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех / 4-е изд.: ДМК Пресс, 2011. 880 с.

10. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А., Ходарев А. Н., Моржин А. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.

11. *Махов В.Е., Потапов А.Й.* Использование алгоритмов вейвлет-анализа для построения оптических измерительных систем // Контроль. Диагностика. 2013. № 1. С. 12 — 21.

12. *Махов В.Е., Потапов А.И.* Использование вейвлет-анализа для диагностики системы технического зрения // Контроль. Диагностика. 2011. № 9. С. 11—18.

13. *Махов В.Е., Потапов А.И.* Исследование измерительной оптической системы в условиях механической нестабильности объекта контроля. // Контроль. Диагностика. 2013. № 2. С. 12—23.

14. *Махов В.Е., Репин О.С., Потапов А.И.* Измерение линейных размеров системами технического зрения в когерентном свете // Контроль. Диагностика. 2014. № 4. С. 12—19.

15. *Dändliker R., Ineichen B., Matier F.M.* High resolution hologram interferometry by electronic phase measurement // Opt. Comm. 1973. V. 9. P. 412.

16. Dändliker R., Elliasson B., Mattier F.M. Accurate determination of the change of curvature (handing) of the surface through holographic interferometry // J. Opt. Soc. Am. 1974. V. 64. P. 1381.

17. *Махов В.Е., Потапов А.И.* Гетеродинно-растровый метод контроля качества изделий // АН СССР. Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 68—84.

18. *Stevenson W.H.* Optical frequency shifting by means of a rotating diffraction grating // Appl. Opt. 1970. V. 9. P. 649.

19. Дьяконов М.И., Фридрихов С.А. Газовый лазер в магнитном поле // УФН. 1966. Т. 90. Вып.4. С. 565—600.

20. Kavinov I.P. An Introduction to Electrooptic Devices / Academic Press, New York, 1974.

21. *Maksarov, V.V., Olt J.* Dynamic stabilization of machining process based on local metastability in controlled robotic systems of CNC machines // Journal of Mining Institute. 2017. V. 226. P. 446–451.