

Исследовательская работа:

**Изучение эффекта отражения в
лечебно-профилактических кроватях на основе
микростеклосфер с кремниво-органическим
покрытием.**



Новое в спекл-интерферометрии

Н.Г. Власов, А.Е. Штанько

В первой части данной лекции уточняются требования к когерентности источников, используемых в спекл-интерферометрии и обосновывается возможность применения многомодовых лазеров, а совместно со специальными ретро-красками - и обычных ламп накаливания. Во второй части лекции описывается модификация методов спекл-интерферометрии, удобная для применения при исследовании в реальном времени и позволяющая, кроме того, устранить влияние спекл-структуры на контраст интерференционных полос.

1. Введение

Новое направление в интерферометрии, основанное на пространственной корреляции интенсивности диффузно-когерентного излучения, последовательно рассматривалось в наших лекциях, начиная с IV школы. Продолжая этот цикл лекций, кратко остановимся на терминологии. В настоящее время в отечественной литературе отсутствует общепризнанное название указанного направления в интерферометрии. Наиболее часто употребляется заимствованный из зарубежной литературы термин "speckle" спекл-интерферометрия, который и будет использован в дальнейшем.

Характеризуя развитие спекл-интерферометрии за последнее время, следует отметить прежде всего оценку диапазонов измерения, расширение области применения, заключающееся в переходе к внестеновым исследованиям и применение методов, основанных на расфокусировке изображения, для решения задач типа изгиба пластин. Указанные вопросы подробно разобраны в появившихся недавно монографиях /1,2/, а также в работе /3/ и в настоящей лекции не рассматриваются. Первая часть лекции посвящена уточнению требований к когерентности освещающего излучения, что позволяет обосновать возможность применения многомодовых лазеров, а совместно с ретрокрасками и обычных ламп накаливания.

Во второй части лекции описываются методы, промежуточные между голографической и спекл-интерферометрией. К их разработке авторов привела необходимость решения двух, с первого взгляда не связанных друг с другом задач, устранения влияния спекл-структуры в голографической интерферометрии и создание методов спекл-интерферометрии, удобных для исследования в реальном времени.

2. Снижение требований, к когерентности освещающего излучения.

Необходимая степень когерентности освещающего излучения определяется областью объекта, по которой в плоскости фотопластинки происходит усреднение отраженного волнового поля, т.е. определяется расфокусировкой изображения объекта. Для того, чтобы усреднение происходило когерентно, область когерентности в плоскости предметов должна превышать размеры объекта, если фотопластинка расположена в фокальной плоскости оптической системы; размеры кружка нерезкости, если фотопластинка, согласно /3/, расположена вблизи плоскости изображения. Минимальные требования к когерентности освещающего излучения предъявляются при исследовании перемещений, когда изображение объекта сфокусировано на фотопластинку.

Эти требования заключаются в том, чтобы волновые поля, усредняемые по элементу разрешения оптической системы, были взаимно когерентны. Конкретизация этого общего требования приводит к необходимости выполнения следующих условий:

длина когерентности l_k должна быть больше среднеквадратичной высоты микроструктуры поверхности объекта; необходимо, чтобы l_k превышала разность оптических путей, образующуюся при отражении освещающего волнового поля от противоположных концов элемента разрешения, отнесенного к пространству предметов; область пространственной когерентности должна разрешаться оптической системой. Перечисленные требования существенно меньше предъявляемых в голографической интерферометрии, что позволяет применять в спекл-фотографии мощные технологические ОКГ.

В нашей работе применялся ОКГ типа ГОР-300, когерентные свойства которого, определенные экспериментально, оказались полностью удовлетворяющими перечисленным выше условиям. Так, длина когерентности, определенная по первому нулю функции взаимной когерентности, оказалась равной 1 мм, что позволяет исследовать протяженные объекты с произвольной чистотой обработки поверхности. Энергия, излучаемая ГОР-300 даже на пороге генерации, позволяет записывать на спекл-фотографии (фотоэмульсии ИАЭ) объекты с поверхностью около 16 м^2 . Однако получение спекл-интерферограмм объектов таких размеров вызывает определенные трудности. Это связано с тем, что диффузно когерентное поле в плоскости объектива фотокамеры является случайной функцией пространственных координат. Перемещение, поворот или деформация объекта приводят к смещению волнового поля в плоскости объектива. Если смещение соизмеримо с диаметром объектива, спекл-структура, зарегистрированная во время второй экспозиции, оказывается декоррелированной по сравнению с первоначальной структурой, что приводит к исчезновению интерференционных полос на восстановленном изображении. Указанное обстоятельство накладывает ограничение на минимально допустимую угловую апертуру объектива со стороны объекта и, следовательно, на допустимый размер объекта. Экспериментальные результаты показывают, что целесообразно исследовать объекты размером не более 1 м^2 . В связи с этим в спекл-фотографии более целесообразно применение ОКГ типа ГОР-30 или ГОР-100. Возможность увеличения размеров исследуемых объектов обсуждается в следующем разделе лекции.

3. Применение ретро-красок

Светоотражающие или ретро-краски находят достаточно широкое применение, в голографической интерферометрии (см. обзор /7/ или монографию /6/). Поверхность, покрытая ретро-краской, отражает освещающее излучение в направлении на освещающий источник. Указанное свойство ретро-красок сравнительно давно использовалось в голографической интерферометрии, позволяя на порядок увеличить размеры исследуемых объектов за счет установления голограммы в процессе записи вблизи освещающего источника.

В работах /8,9/ было показано, что применение ретро-красок позволяет использовать в спекл-фотографии обычные источники белого света - лампы накачивания. Основной составляющей частью ретро-красок является алюминиевая пудра и стеклянные микросферы небольшого диаметра: $15 \div 200 \text{ мкм}$ (рис.1). Применение алюминиевой пудры повышает коэффициент отражения, а наличие микросфер существенно изменяет отражающие свойства поверхности, обеспечивая рассеяние

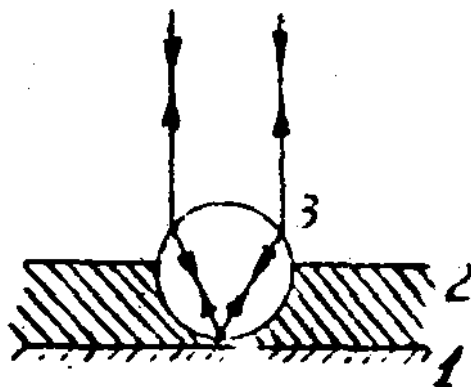


Рис.1.

Поверхность объекта, покрытая ретро-краской:

1 - поверхность; 2 - алюминиевая пудра; 3 - стеклянная микросфера. Стрелками показаны направления освещения и отражения лучей.

освещающего излучения в узком телесном угле, ось которого направлена на освещающий источник. Стеклянные микросферы создают вблизи поверхности сильно уменьшенные изображения источника. Если область когерентности освещающего источника разрешается оптической системой, то эти вторичные источники, усредняемые по элементу разрешения, взаимно когерентны и их интерференция приводит к образованию спекл-эффекта. Если же область когерентности не разрешается оптической системой, то плотность заполнения поверхности стеклянными сферами выбирают такой, чтобы в пределах элемента разрешения находилась в среднем одна микросфера. Согласно /5/, объект при этом фотографируют при помощи частично заполненной апертуры, содержащей два отверстия /7,9/. Для получения спекл-фотографий с несущей пространственной частотой необходимо выполнение одного из двух условий: либо область когерентности освещающего источника должна превышать размеры микросферы, либо область когерентности изображения источника, созданного микросферой, должна превышать действующий диаметр объектива оптической системы.

Остановимся кратко еще на двух полезных применениях ретрокрасок, не отмеченных в /5,6/. Первое из них основано на том, что поверхность, покрытая ретрокраской, вне зависимости от угла падения освещающего излучения, отражает его в направлении источника, поэтому деформация объекта приводит к существенно меньшей деформации отраженного волнового фронта. Если выбрать плотность заполнения поверхности стеклянными микросферами такой, чтобы в плоскости изображения поверхности отсутствовала интерференция между волновыми полями, отраженными от соседних микросфер, то взаимное смещение микросфер также не приводит к декорреляции спекл-структуры. Предварительные эксперименты, выполненные авторами лекции, показали, что за счет использования ретрокрасок размеры исследуемых объектов можно увеличить примерно на порядок.

Другое оригинальное применение ретрокрасок также основано на их необычных отражающих свойствах, пользуясь которыми можно разрабатывать оптические схемы, не имеющие аналога в классической оптике и, следовательно, открывающие новые возможности в интерферометрии.

Примером такого использования является спекл-интерферометр, оптическая схема которого, представленная на рис.2, позволяет вдвое увеличить чувствительность по сравнению со спекл-интерферометром /9/, предназначенным для выделения

тангенциальных перемещений и деформаций диффузно отражающих объектов. Луч лазера фокусируется линзой 1 на маленькое зеркало 2, расположенное на оси оптической системы, коллимируется линзой 3 и с помощью призмы 4 освещает поверхность исследуемого объекта 5 по двум направлениям под углами $\pm\beta$. Излучение, отраженное в направлении освещения, проходит диафрагму 6, содержащую два круговых отверстия, и попадает на билинзу 7, совмещающую два изображения в плоскости фотопластинки 8. Совмещенные изображения накладываются под некоторым углом друг к другу, в результате чего возникает несущая пространственная частота /7,8/. Если фотография получена методом двойной экспозиции - до и после приложения к объекту деформирующей нагрузки, то изображение, восстановленное в первом порядке дифракции, оказывается покрытым интерференционными полосами, образующими контуры равных значения проекции вектора перемещения $\Delta r_x(x,y)$ на ось X. Их уравнение:

$$4\Delta r_x \sin\beta = N\lambda, \quad (1)$$

где N - порядковый номер интерференционной полосы; λ - длина волны, показывает, что чувствительность метода действительно увеличилась вдвое по сравнению с /9/.

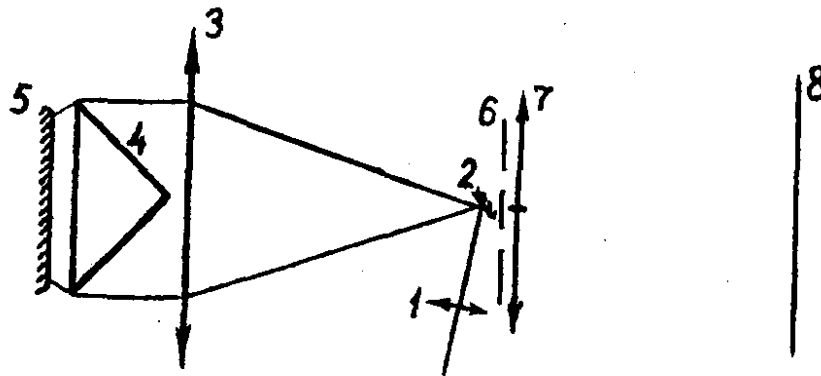


Рис.2. Спекл-интерферометр с удвоенной чувствительностью. Обозначение позиции дано в основном тексте.

3. Методы, промежуточные между голографической и спекл-интерферометрией

3.1. Устранение влияния спекл-структуры в голографической интерферометрии.

Восстановим голограмму сфокусированного изображения, на которой записан диффузно отражающий объект не опорным, как это обычно делается, а объектным волновым полем. Восстановленное в первом порядке дифракции волновое поле описывается произведением вида gg^*f , где $f(\)$ и $g(\)$ - комплексные амплитуды опорного и объектного волновых полей. Соответственно, спектр пространственных частот имеет вид \dots , где значками \int и $*$ обозначены интегральные операции автокорреляции и свертки.

Свертка остальной части функции \dots со спектром опорного волнового поля описывает диффузный интермодуляционный шум, наложенный на восстановленное, как следует из (2), опорное волновое поле. Последнее может быть отделено от шума при помощи оптической фильтрации, заключающейся в фокусировке восстановленного опорного пучка в центр небольшого отверстия в непрозрачном экране. Размеры отверстия определяются следующими соображениями. Восстановленное волновое поле ограничено контурами изображения объекта, зарегистрированного на голограмме; другими словами восстановленное волновое поле промодулировано распределением яркости по объекту и

выражение (2) справедливо только в первом приближении. Размеры фильтрующего отверстия должны быть таковы, чтобы пропустить спектр этого распределения, тогда отфильтрованное изображение объекта будет практически свободно от спекл-шума. Описанная методика позволяет получать интерферограммы, приближающиеся по своему контрасту к интерферограммам зеркально отражавших или прозрачных фазовых объектов. Кроме того, становится возможным применять к диффузно-отражающим объектам все методы исследования, известные в классической интерферометрии. Так, установив на выходе фильтра сдвиговой интерферометр, можно с помощью одной и той же голограммы в реальном времени получать различные сдвиговые интерферограммы, несущие информацию о деформации объекта, причем величина и направление сдвига определяются только настройкой сдвигового интерферометра. Следует отметить, что при восстановлении голограммы объектным волновым полем теряется информация об объемности объекта, однако в голографической интерферометрии эта информация является зачастую избыточной, так как количественные данные в большинстве методов подучат по фотографии восстановленного изображения.

3.2. Интерференционное сравнение статистически не зависимых диффузно когерентных волновых полей.

Пусть теперь на голограмме сфокусированного изображения последовательно или одновременно записаны два пространственно совмещенных изображения одного и того же или различных диффузно отражающих объектов с одним и тем же опорным пучком. При восстановлении голограммы объектными волновыми полями на выходе описанного в разделе

3.1. фильтра пространственных частот появятся два пространственно совмещенных изображения. Соответствующие им волновые поля синфазны, так как они являются фактически двумя восстановленными опорными волновыми полями. Их тождественность обусловлена процессом записи голограмм. Изменение фазы восстанавливавшихся волновых полей приводит к такому же изменению фазы восстановленных волновых полей, а интерференционная картина на восстановленном изображении определяется разностью этих изменений фазы.

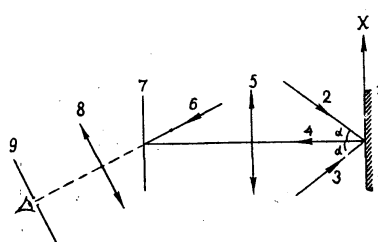


Рис.3. Схема интерференционного измерения проекции вектора перемещения в реальном времени:
1 - исследуемый объект, 2,3 - освещающие пучки; 4 - предметный пучок; 5 - объектив, 6 - опорный пучок; 7- голограмма; 8 - линза; 9 - экран с отверстием.

Если в процессе записи голограммы освещать объект не двумя, как на рис.3, а четырьмя волновыми полями, направления распространения которых не лежат на одном общем конусе, то, освещая объект в процессе восстановления лишь по двум направлениям из четырех в трех различных сочетаниях, на выходе фильтра можно наблюдать три различных интерферограммы, исходя из которых можно определить все три проекции вектора перемещения. Другим вариантом решения этой же задачи является поочередное восстановление голограммы каждым из использованных при записи объектных волновых

полей и получение интерференционной картины, образованной восстановленным и реально существующим опорными волновыми полями. Завершая описание методов интерференционного сравнения статистически не зависимых диффузно когерентных волновых полей, приведем оценки отношения сигнал-шум и контраста интерференционных полос на выходе фильтра. Основываясь на свойствах автокорреляционных функций конечных реализации случайных процессов, описанных в [10], можно получить следующее приближенное выражение для отношения средней интенсивности J_s восстановленных опорных пучков, создающих интерференционную картину, к средней интенсивности J_N диффузно рассеянного шума на выходе фильтра.

$$\frac{J_s}{J_N} \sim \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha f}{d} \right)^2, \quad (3)$$

где α - угловая апертура оптической системы, фокусирующей изображение объекта на голограмму; f - фокусное расстояние фильтрующей линзы; d - диаметр фильтрующего отверстия.

Величина d выбирается из условия пропускания спектров пространственных частот обоих восстановленных опорных полей (при деформации объекта, приводящей к изменению фазы восстановленных полей, их спектры изменяются и, в частности, могут смешаться). Для интересующих на практике случаев может быть легко выполнено условие $d/f \ll \alpha$, что обеспечивает соотношение $J_s/J_N \gg 1$.

Формула (3) справедлива для случая, когда отсутствует декорреляция волновых полей, рассеянных деформированным объектом по отношению к первоначально записанным полям. При наличии декорреляции отношение J_s/J_N падает пропорционально падению коэффициента корреляции указанных полей.

Контраст интерференционной картины V на выходе фильтра определяется выражением:

$$V = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}} = \frac{J_s/J_N}{J_s/J_N + 1}. \quad (4)$$

Как отмечено выше, $J_s/J_N \gg 1$, поэтому контраст интерференционной картины близок к единице.

3.3. Заключение

Сравним описанные методы с голографической и спекл-интерферометрией. Как и в голографической интерферометрии, на стадии записи голограммы присутствует опорное волновое поле. В то же время восстановление голограммы объектными волновыми полями приводит к тому, что восстановленное изображение пропорционально взаимной интенсивности волновых полей, отраженных от объекта, находящегося в первоначальном и измененном состояниях. Эта особенность сближает описанные методы со спекл-интерферометрией, по сравнению с которыми они более удобны для исследования в реальном времени. Полученные результаты интересно оценить и с другой точки зрения. Голограмму диффузно отражающего объекта, восстанавливаемую самим объектом, можно рассматривать как некоторый компенсирующий оптический элемент, преобразующий диффузно рассеянное объектное волновое поле в опорное, промодулированное распределением яркости по объекту.

Псевдокипящий слой, позволяющий создать условия невесомости при помещении больного на лечебно-ожоговую и противоположную кровать, образуется при пропускании воздуха через микрошарики. Плотность псевдокипящей жидкости составляет $1,2-1,3$ г/см³.

Микрошарики изготавливаются из калий-натриевого стекла. На поверхность микрошариков наносится кремнийорганическое покрытие.

Повышенное содержание щелочных компонент в составе стекла обеспечивает стерильность воздуха, проходящего через стекломикрошарики. Это достигается образованием щелочной среды при попадании выделений больного в кровать через фильтрующую простыню. Щелочная среда является губительной для микроорганизмов. При отсутствии выделений микроорганизмы погибают в среде стекломикрошариков за счёт повышенной сухости.

Размеры стекломикрошариков находятся в пределах 50-160 мкм. Для медицинских кроватей "САТУРН-90", "CLINITRON" /Франция/ пик распределения микрошариков по размерам находится в диапазоне 120-130 мкм. Для медицинских кроватей "LIFE LEND" /Япония/ пик распределения микрошариков находится в районе 80 мкм. В связи с этим стекломикрошарики, используемые в кроватях "САТУРН-90" и "CLINITRON" не переходят в псевдокипящее состояние в японской кровати. ООО "РИТМ" имеет участок по изготовлению стекломикрошариков для всех известных видов лечебно-ожоговых и противоположных кроватей. Создана технология аппретирования стекломикрошариков (нанесение на их поверхность кремнийорганического покрытия).

Необходимость нанесения на поверхность стекломикрошариков кремнийорганического покрытия вызвана тем, что на поверхности стекла имеются различные дефекты присоединяющие молекулы воды. Стекломикрошарики без покрытия имеют вид муки и не могут переходить в псевдокипящее состояние. Стекло с кремнийорганическим покрытием частично отталкивает воду. Однако толщина покрытия должна быть достаточно малой и оно не должно быть сплошным. Это связано с тем, что при смачивании щелочные элементы из стекла должны выходить на поверхность стекломикрошарика, обеспечивая стерильность среды.

Этот участок позволяет изготавливать до 60 тонн стекломикрошариков в год. Загрузочные объёмы для взрослых лечебно-ожоговых кроватей составляют 630 кг. Одним из основных этапов изготовления стекломикрошариков является процесс обеспыливания. Так как размеры ячейки фильтрующей простыни составляют около 43 мкм, то с целью предотвращения проникновения стекломикрошариков в кровати через фильтрующую простыню, в процессе обеспыливания из микрошариков удаляются частицы с размерами меньше 50 мкм. Эта задача выполняется с помощью воздушного классификатора, позволяющего понизить концентрацию "пылеватых" частиц до 0,1-0,3 %.

Стекломикрошарики с таким количеством "пылеватых" частиц позволяют избежать длительного обеспыливания в процессе работы кровати и дают возможность приступить к лечению больного сразу после выхода кровати на необходимый температурный режим. Классификатор, входящий в состав технологического оборудования, позволяет обеспыливать до 70 кг/час исходных микрошариков. Выделения больного, попадая через фильтрующую простыню в стекломикрошарики, загрязняют их. Жидкая фракция испаряется, клейкая составляющая образует комки, которые оседают

на дно кровати и не участвуют в образовании псевдокипящего слоя. С течением времени на поверхности стеклошариков накапливаются органические вещества и стеклошарики, в конце концов, могут потерять способность к образованию псевдокипящего слоя.

Одним из важнейших элементов лечебно-ожоговой и противоположной кровати является фильтрующая простыня, отделяющая тело больного от стеклошариков.

Требования предъявляемые к фильтрующей простыне сводятся к тому, что она должна свободно пропускать воздух, проходящий через стеклошарики и удерживать стеклошарики в пределах кровати.

Минимальный размер стеклошариков составляет 50 мкм, а ячейка фильтрующей простыни имеет размер 43 мкм.

В качестве материала, из которого изготавливается ситовая ткань, применяемая в фильтрующей простыне, служит полиэфирное моноволокно, удовлетворяющее предъявляемым санитарно-гигиеническим требованиям.

Ситовая ткань не должна иметь ткацких дефектов, так как каждый дефект является каналом проникновения стеклошариков за пределы кровати. Разработанные методы обработки ткани, ее выбраковки позволили наладить производство простыней для всех видов лечебно-ожоговых и противоположных кроватей.

В последнее время разработан новый тип ткани, имеющий ячейку прямоугольной формы 28 x 43 мкм, не пропускающей по узкой стороне стеклошарики. На способ ткачества авторами получен патент на изобретение РФ. Обработка фильтрующей простыни сводится к ручной стирке при температуре 40⁰С с использованием стирального порошка. Сушка простыни производится при комнатной температуре. Термической обработке простыня не подвергается. Стерильность обеспечивается путем пропускания стерильного, сухого воздуха, проходящего через стеклошарики. Как показала практика все посевы на фильтрующей простыне погибают.

В настоящее время общество "Ритм" выпускает следующие фильтрующие простыни:

- *овальной формы для медицинских кроватей "Сатурн-90" КМ-04, КМ-05, "Clinitron" (овальной формы), "Life Lend";*
- *фильтрующие простыни для медицинских кроватей "Clinitron" прямоугольной формы;*
- *фильтрующие простыни для детской лечебно-ожоговой и противоположной кровати КМ-06 "Сатурн-90";*
- *фильтрующие простыни для лечебно-реабилитационной кровати КМ-07 "Сатурн-90" для новорожденных и грудных детей с неврологической патологией.*

Предусмотрена возможность изготовления нестандартных простыней, например для прямоугольной детской кровати "Clinitron", которые очень редко встречаются в больницах.