

ОБРАБОТКА СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОИНТЕРФЕРОГРАММ

© 2012 Ю. Д. Щеглов

Самарский государственный университет

Рассмотрена последовательность действий в предложенном интерактивном способе количественной интерпретации спекл-интерферограмм, полученных при статической или динамической нагрузке элементов конструкции.

Спекл-интерферограмма, реперная точка, сплайн-интерполяция, опорная линия, сплайн-поверхность.

Введение

В настоящее время для исследования деформации или формы собственных колебаний ответственных деталей и узлов аэрокосмической техники широкое распространение получила технология так называемой электронной спекл-интерферометрии [1,2]. Это устоявшееся название отражает три существенных обстоятельства: во-первых, для регистрации, хранения, воспроизведения, обработки и представления экспериментальной информации используются средства электроники; во-вторых, несущей для информативного сигнала является спекл-структура; в-третьих, полезная информация проявляется в процессе интерференции случайного поля спекл-структуры с когерентным фоном – опорным сигналом.

Для получения информации о статической или колебательной деформации объекта регистрируются два его изображения в исходном и возмущённом состояниях. Далее вычисляется модуль разности этих изображений.

Если в промежутке между съёмками состояние объекта изменилось, то на разностном изображении появится семейство интерференционных полос – спекл-интерферограмма, которая характеризует деформацию поверхности объекта.

На рис.1 в качестве примера приведена спекл-интерферограмма анализируемой детали в виде плоского кольца, к верхней точке 1 которого приложена пара сил. На поверхности детали в результате её изгибной деформации появляется семейство интерференционных полос 2.

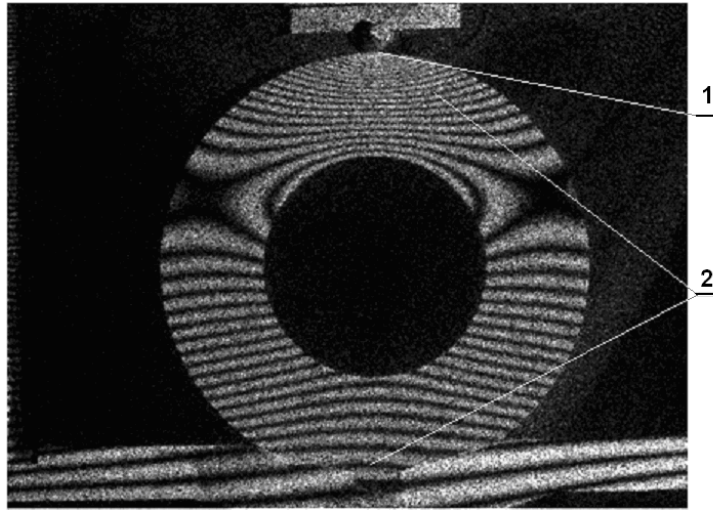
Наличие опорного сигнала обеспечивает измерительной схеме фазовую чувствительность. Поэтому термин “деформация” означает не только пространственное пере-

мещение точек исследуемой поверхности, но и изменение формы волнового фронта оптического сигнала на пути его распространения через оптически неоднородную среду. То есть методом электронной спекл-интерферометрии можно исследовать поля и некоторых других физических величин (температура, давление, концентрация, упругие напряжения), влияющих на показатель преломления среды, а следовательно и на фазу оптического сигнала.

При решении широкого класса задач, например для контроля внутренних дефектов в слоистых материалах или при качественном исследовании тепловых потоков, спекл-интерферограмма имеет самостоятельную ценность. Однако для решения более сложных задач, например для получения поля скоростей при динамической деформации объекта или для вычисления диаграммы звукового поля колеблющегося объекта, требуется количественная интерпретация (расшифровка) спекл-интерферограммы, т.е. переход от визуального изображения (от спекл-интерферограммы) к математической функции (к полю деформаций).

Алгоритм расшифровки спекл-интерферограммы зависит от типа интерферометра, реализованного в конкретной измерительной схеме. Известны, например, интерферометры поперечного сдвига, интерферометры поворота, интерферометры с многолучевым освещением объекта и т.д.

Однако наибольшее распространение получили измерительные схемы, чувствительные к перемещению поверхности объекта (или к фазовым искажениям прозрачной среды) в направлении наблюдения. Именно на этот случай и ориентирован предлагаемый способ расшифровки спекл-интерферограмм.



*Рис.1. Спекл-интерферограмма изгибной деформации анализируемого объекта в виде плоского кольца:
1-точка приложения пары сил; 2- семейство интерференционных полос*

В настоящее время расшифровка интерферограмм проходит в несколько стадий [3,4].

Сначала на интерференционных полосах спекл-интерферограммы задаётся некоторый массив опорных (реперных) точек. Для каждой реперной точки определяют её координаты в плоскости спекл-интерферограммы и с этой точкой ассоциируют порядок интерференции (номер) полосы. Одну из реперных точек принимают за начальную.

Затем по разности номеров полос вычисляется нормальное перемещение контролируемой поверхности в каждой реперной точке относительно начальной. При вычислении пространственного перемещения учитывается длина волны излучения используемого лазера. При определении изменения параметра фазового объекта учитывается, кроме того, зависимость показателя преломления прозрачной среды от этого параметра.

И, наконец, формируется результат расшифровки в виде таблицы, в которой указаны координаты и перемещение каждой реперной точки заданного их массива.

Недостатки такой технологии: деформация контролируемой поверхности определяется только для ограниченного массива реперных точек, расшифровка спекл-интерферограммы и формирование выходной информации производится вручную, для вычисления поля деформации требуется ка-

кая-либо подходящая внешняя математическая программа.

Сущность предлагаемого способа

Идейные основы рассматриваемого способа количественной обработки интерферограмм изложены автором в [5]. В предлагаемом способе расшифровки спекл-интерферограммы также можно условно выделить несколько стадий.

- Так же, как и в известном способе, выбирается некоторый массив реперных точек, лежащих на интерференционных полосах, задаются их координаты и номера соответствующих им интерференционных полос.

- Массив реперных точек аппроксимируется методом двумерной параболической интерполяции гладкой математической функцией – сплайн-поверхностью, которая представляет собой математическую модель поля деформаций.

- Вычисляется сечение сплайн-поверхности множеством плоскостей, расчётные уровни которых соответствуют целому числу полувольт используемого лазерного излучения. Линии равного уровня (изотопы) по физическому смыслу соответствуют интерференционным полосам спекл-интерферограммы, а семейство изотоп (топограмма) по существу является математической моделью спекл-интерферограммы.

- Топограмма отображается на фоне исходной спекл-интерферограммы. В идеальном случае, когда сплайн-поверхность

точно воспроизводит поле деформаций, изотопы топограммы будут совпадать с интерференционными полосами спекл-интерферограммы. В общем же случае первое приближение сплайн-поверхности подлежит уточнению.

- Первое приближение сплайн-поверхности уточняется в интерактивном режиме до приемлемого совпадения топограммы и спекл-интерферограммы. Уточнённая сплайн-поверхность будет представлять собой искомую математическую функцию, описывающую поле перемещений точек поверхности объекта вследствие его деформации.

- Формируется и сохраняется выходная информация.

Главная идея, воплощённая в предлагаемом способе, заключается в том, что в памяти ЭВМ изначально создаётся математическая модель поверхности, а затем форма этой поверхности целенаправленно изменяется в наглядном интерактивном режиме.

Все операции, связанные с построением гладких кривых, проходящих через массив заданных реперных точек, используют известную из математики параболическую интерполяцию [6].

Интерполяционный многочлен $\phi_n^k(\xi)$ определяется формулой Лагранжа:

$$\phi_n^k(\xi) = L_0(\xi) \cdot f_0 + L_1(\xi) \cdot f_1 + \dots + L_n(\xi) \cdot f_n, \quad (1)$$

где n – степень полинома или количество интервалов между точками; k – условный индекс, обозначающий, какая пространственная координата x , y или z определяется (x, y – координаты в плоскости спекл-интерферограммы, z – численное значение сплайн-поверхности); ξ – аргумент интерполяционного полинома.

$$L_i(\xi) = \frac{(\xi - \xi_0) \dots (\xi - \xi_{i-1})(\xi - \xi_{i+1}) \dots (\xi - \xi_n)}{(\xi_i - \xi_0) \dots (\xi_i - \xi_{i-1})(\xi_i - \xi_{i+1}) \dots (\xi_i - \xi_n)}, \quad (2)$$

где $f_i = f(\xi_i)$ – численные значения соответствующей координаты x, y или z в узлах интерполяции ξ_i .

Пространственная кривая определяется тремя функциями, каждая из которых

описывает зависимость координат x, y, z точки соответственно от параметра ξ .

Непосредственно вычислительный алгоритм параболической интерполяции (сплайн-интерполяции) для его последующей программной реализации заимствован и переведен на язык C++ из [7], где этот алгоритм изложен на языке Бейсик.

Интервал интерполяции равен длине ломаной линии, соединяющей реперные точки. Аргумент ξ интерполяционного полинома равен удалению текущей точки полинома от начала ломаной. Алгоритм формирования первого приближения сплайн-поверхности методом двумерной параболической интерполяции, принятый в настоящей работе, заключается в том, что сначала строятся несколько опорных пространственных линий, на которые затем, как на “шпангоуты”, вплотную друг к другу устанавливаются “стрингеры”.

Перед собственно расшифровкой спекл-интерферограммы производятся, как это показано на рис. 2, вспомогательные операции: указывается прямоугольная область задания 1 сплайн-поверхности и задаётся криволинейный контур фрагмента 2 исследуемой поверхности, представляющего практический интерес.

Расшифровка спекл-интерферограммы начинается с построения нескольких опорных линий. Каждая опорная линия, как это показано на рис.3, задаётся несколькими реперными точками 1, через которые, как через узлы интерполяции, проводится гладкая пространственная кривая 2. В зависимости от характера спекл-интерферограммы выбирается направление задания реперных точек. На рис.3, например, интерференционные полосы преимущественно ориентированы в горизонтальном направлении, поэтому реперные точки в данном случае целесообразно задавать вдоль одной “горизонтальной” интерференционной полосы (при этом её номер требуется ввести только один раз). Если реперные точки задаются на разных интерференционных полосах, то их номера вводятся для каждой очередной точки.

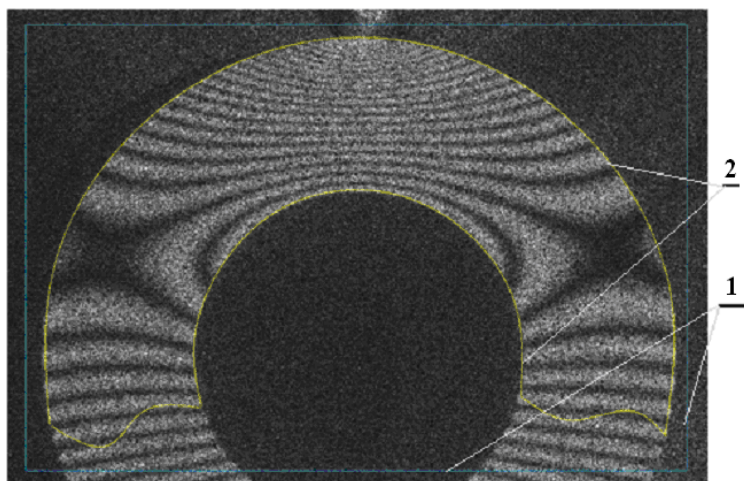


Рис.2. Область задания сплайн-поверхности на исходной спекл-интерферограмме (см. рис.1):
1- полная область задания сплайн-поверхности; 2- фрагмент, представляющий практический интерес

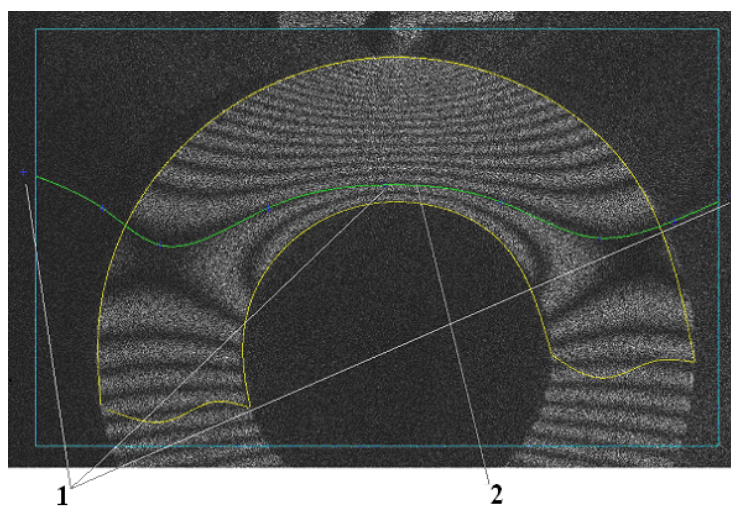


Рис.3. Опорная линия: 1 - реперные точки, 2- опорная линия

На рис.4 показано несколько опорных линий, проведённых вдоль линий разного порядка интерференции. Номера интерференционным линиям (на рис.4 отмечены цифрами) присваиваются, исходя из общего представления о характере деформации. Наличие нескольких опорных линий достаточно для построения первого приближения сплайн-поверхности. Для этого описанным методом параболической интерполяции строятся гладкие кривые, проходящие через точки опорных линий, которые используются в качестве узлов интерполяции.

Для случая, когда выбраны “горизонтальные” опорные линии, заполнение сплайн-поверхности производится построением кривых, лежащих в вертикальных плоскостях.

На рис.5 и 6 первое приближение сплайн-поверхности представлено для

глядности в двух видах. На рис.5 приведено полутоновое изображение, полученное математическим моделированием процесса интерференции двух волн: волны, у которой волновой фронт описывается сплайн-поверхностью, и волны с плоским волновым фронтом. Это изображение представляет собой ванную копию исходной спекл-интерферограммы – псевдоинтерферограмму. На рис.6 та же сплайн-поверхность представлена линиями 1 равного уровня (изотопы), которые в идеале должны воспроизводить интерференционные полосы экспериментально полученной спекл-интерферограммы. Цифрами 2 на рисунке помечены участки сплайн-поверхности, лежащие уточнению.

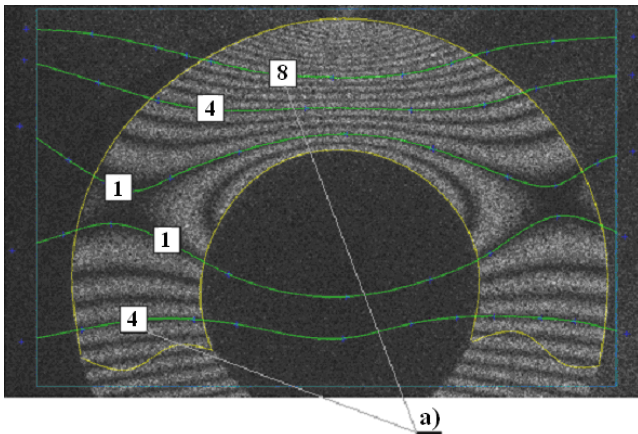


Рис.4. Массив выделенных опорных линий: а) - 1, 4 и 8

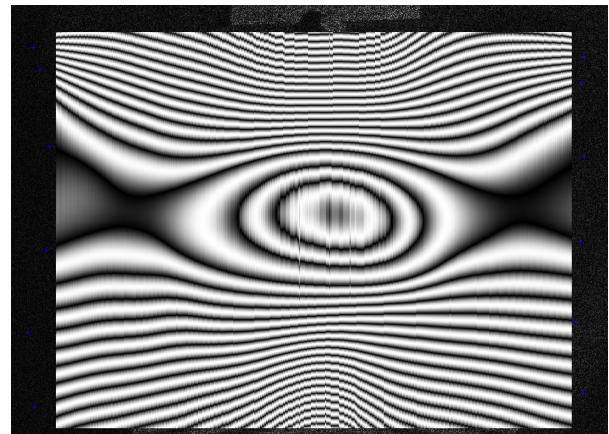


Рис.5. Полутоновое изображение полученной псевдоинтерферограммы

Несовпадение изотоп топограммы с интерференционными полосами спекл-интерферограммы наглядно показывает погрешность определения первого приближения сплайн-поверхности. Уточнение сплайн-поверхности заключается в том, что к сплайн-поверхности прибавляется или из неё вычитается корректирующая колоколообразная функция с заданными параметрами. При этом текущий вид топограммы оперативно изменяется. Процесс повторяется до приемлемого совпадения топограммы и спекл-интерферограммы. Нагляд-

но процесс уточнения сплайн-поверхности напоминает "чеканку" барельефа из листовой заготовки. Место нанесения "удара", "направление и сила удара", "радиус инструмента" задаются как параметры корректирующей функции.

На рис.7 показан результат уточнения сплайн-поверхности. В районе ранее выделенного её фрагмента изотопы практически совпадают с интерференционными полосами спекл-интерферограммы, т.е. уточнённая таким образом сплайн-поверхность достаточно точно описывает поле деформации объекта.

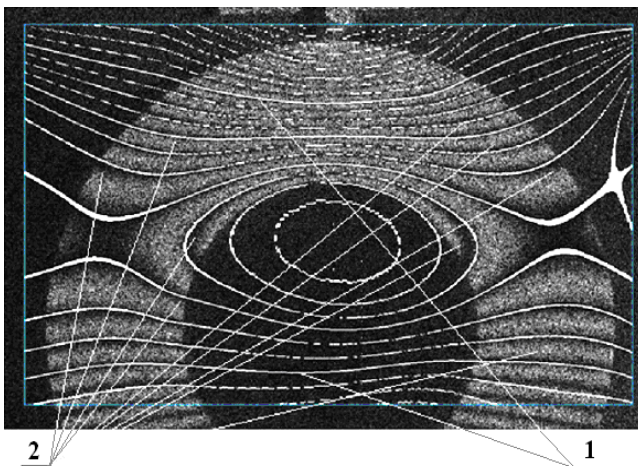


Рис.6. Построенное семейство изотоп 1 топограммы, совмещенное с соответствующими полосами спекл-интерферограммы, и их участки 2, подлежащие уточнению

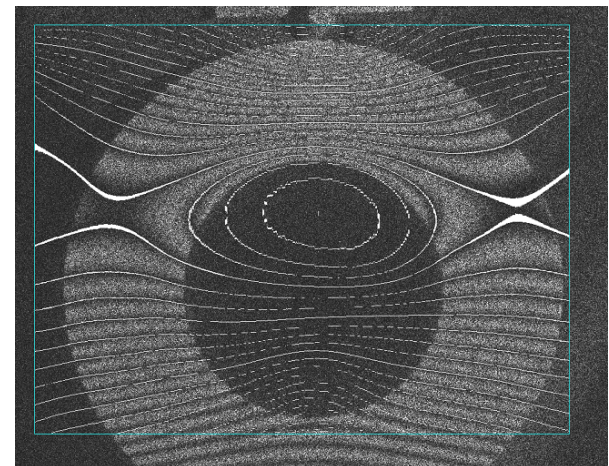


Рис.7 Топограмма выделенного фрагмента спекл-интерферограммы после уточнения сплайн-поверхности

Участки сплайн-поверхности, лежащие за пределами выбранного фрагмента, представляют собой "отходы" и подлежат удалению, что формально означает уточнение области задания сплайн-поверхности. Изначально все точки сплайн-поверхности имеют признак **true**. Уточнение области задания

сплайн-поверхности заключается в том, что выходная информация ограничивается только выбранным её фрагментом. Это достигается тем, что точкам за пределами выбранного её фрагмента присваивается признак **false**, и в дальнейшем эти точки не используются. Рис.8 поясняет процесс удаления "отходов"

сплайн-поверхности. На фоне псевдоинтерферограммы 1 показан контур 2 ранее выделенного фрагмента. Наглядно этот процесс напоминает фрезеровку заготовки по контуру. На рис.8 показаны несколько заходов 3 виртуальных “фрез” разного диаметра. Псевдоинтерферограмма выбранного фрагмента сплайн-поверхности после его

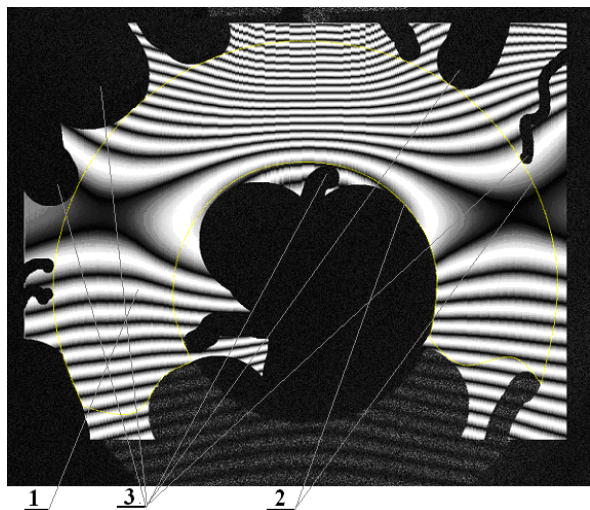


Рис.8. Наглядное представление процесса удаления “отходов” сплайн-поверхности методом “фрезеровки”: 1 – псевдоинтерферограмма; 2 – фрагмент; 3 – “заходы фрез” разного диаметра

чательной “фрезерной” обработки показана на рис.9. Для большей информативности на фоне псевдоинтерферограммы указаны перемещения 1 нескольких точек контролируемой поверхности. Числовые значения перемещения в микрометрах относятся к левому верхнему углу текстового поля.

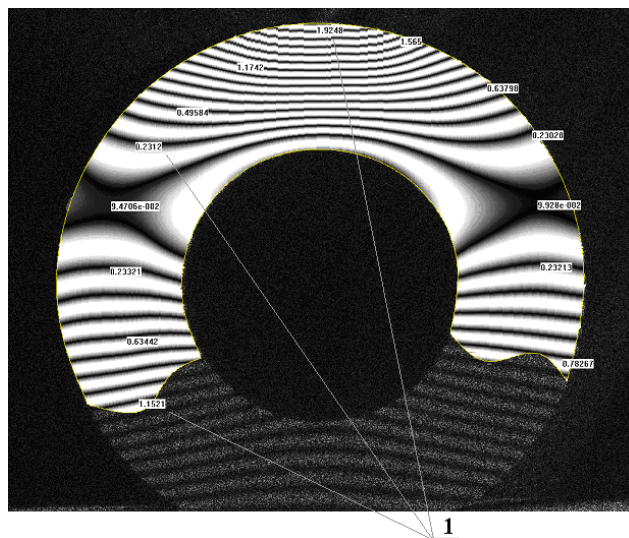


Рис.9. Псевдоинтерферограмма фрагмента сплайн-поверхности с указанием перемещений выделенных точек 1 контролируемой поверхности

Поле деформации контролируемой поверхности может быть представлено в форме топограммы, показанной на рис.10. На

этом рисунке на фоне контролируемого объекта 1 показано семейство изотоп 2, уровни которых впечатаны в текстовые поля 3.

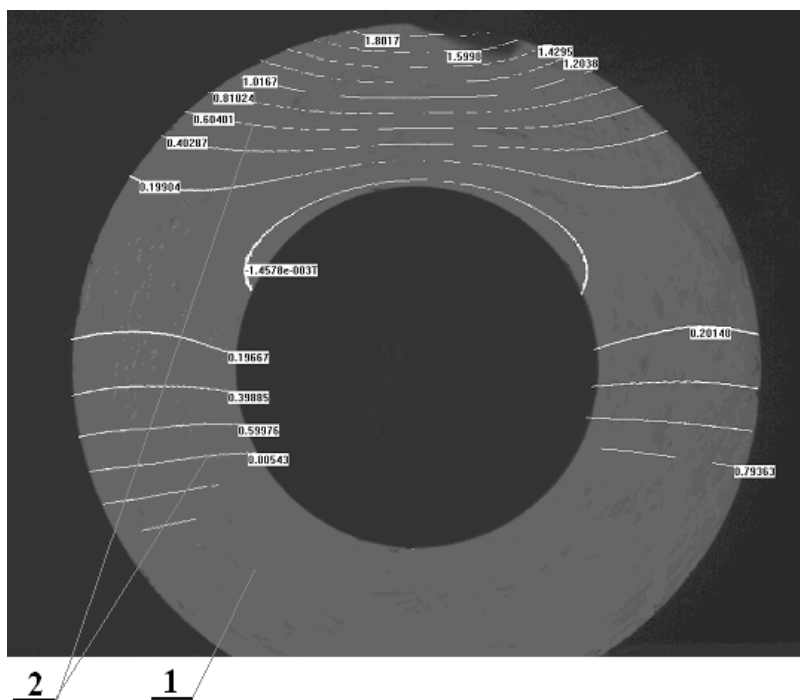


Рис.10. Топограмма фрагмента сплайн-поверхности контролируемого объекта 1 с оцифрованными изотопами 2

Если результат расшифровки спекл-интерферограммы предполагается использовать для последующей математической обработки, числовые значения координат и перемещений точек контролируемой поверхности преобразуются в символьную форму, а выходная информация формируется в виде текстового файла в формате, доступном для восприятия внешними математическими программами. На рис.11 показан фрагмент такого текстового файла.

```

410 290 1.2111
420 290 1.224
430 290 1.2351
440 290 1.2438
450 290 1.2546
370 300 1.1247
380 300 1.1301
390 300 1.1403
400 300 1.1517
410 300 1.1621
420 300 1.174
430 300 1.1846
440 300 1.1934
450 300 1.2038
460 300 1.2141
350 310 1.0683
370 310 1.0779
380 310 1.0829
390 310 1.0927
.....
1      2      3
    
```

Рис.11. Фрагмент текстового файла: 1- координата x ; 2- координата y ; 3- перемещение контролируемой поверхности (в микрометрах) в точке x, y

Выходная информация в зависимости от специфики решаемой задачи может быть представлена в нескольких различных вариантах: исходная спекл-интерферограмма (рис.1); псевдоинтерферограмма (рис.9); топограмма (рис.10); текстовый файл.

Программная реализация

Предлагаемый способ расшифровки спекл-интерферограмм практически реализован в программе **DeshifrInterf.exe**. Программа разработана на языке C++ в среде программирования **Visual C++**. Программа **DeshifrInterf.exe** предоставляет пользователю графический интерфейс в виде диалоговой панели с набором кнопок, текстовых полей ввода и других элементов управления. Кнопки предназначены для выбора текущего режима работы, текстовые поля используются для ввода параметров функций-

обработчиков. Практически вся функциональная нагрузка возложена на манипулятор “мышь” и частично на клавиатуру.

Кроме операций, непосредственно определяющих предлагаемый способ расшифровки спекл-интерферограмм, программа **DeshifrInterf.exe** позволяет выполнять и некоторые другие, вспомогательные, операции:

- указать длину волны используемого лазерного излучения;
- открыть список изображений объекта в различных его состояниях;
- получить спекл-интерферограмму из произвольно выбранной пары изображений;
- расшифровать уже готовую, полученную ранее спекл-интерферограмму;
- отобразить гистограмму распределения по яркости точек выбранного изображения;
- скорректировать яркость и контраст спекл-интерферограммы;
- подчеркнуть плохо различимую интерференционную полосу;
- определить видность интерференционной полосы;
- определить наклон интерференционной полосы в заданной точке;
- отобразить текущие координаты указателя “мыши” и величину перемещения точки;
- впечатать значение сплайн-поверхности в точке левого щелчка мыши;
- выполнить прокрутку изображения, размеры которого превышают поле графического вывода;
- сохранить выходную информацию в графическом или текстовом файле.

Заключение

Сущность предлагаемого способа расшифровки спекл-интерферограммы заключается в ручной “подгонке” в интерактивном режиме заранее подготовленной математической поверхности к искомому полю деформации физической поверхности.

Программная реализация предлагаемого способа предоставляет графический интерфейс, который наглядно отображает текущую погрешность такой “подгонки” и обеспечивает возможность оперативной её компенсации.

Координаты реперных точек программно привязаны к текущим координатам указателя “мыши” в момент её левого щелчка.

Относительно сложная задача расшифровки спекл-интерферограмм сводится к элементарным манипуляциям “мышью” и клавиатурой.

Поле деформации исследуемой поверхности вычисляется по ограниченному массиву реперных точек без привлечения сторонних математических программ.

Имеется возможность выбора формы представления выходной информации в зависимости от специфики решаемой задачи.

Перечисленные особенности предложенного способа расшифровки спекл-интерферограмм обеспечивают относительно малую трудоёмкость процесса и удовлетворительное качество выходной информации.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (Проект П 939)”.

Библиографический список

1. Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия [Текст]: [пер. с англ.] / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986.- 328 с.
2. Электронный спекл-интерферометр для внестеновой вибро-акустической диагностики энергетических установок [Текст] / О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров, Ю.Н. Ша-

пошников [и др.] // РК техника: науч.-техн. сб.- 2000. - №1. – С. 200-208.

3. Программное обеспечение системы анализа данных голографической интерферометрии [Текст] / А.И. Жужукин, М.И. Крайнюков, А.Г. Храмов [и др.] // тез. докл. областного науч.-техн. семинара «Применение лазеров в науке и технике». – Тольятти: ВАЗ, 1989. – С. 107-108.

4. О получении распределения температур в жидкости и твердом теле с помощью голографической интерферометрии [Текст] / В.В. Батькович, О.Н. Буденкова, В.Б. Константинов [и др.] // Журнал технической физики.- 1999. - №6. - Т. 69.– С. 106-111.

5. . Представление форм собственных колебаний объекта двумерным сплайном [Текст] / О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров, Ю.Н. Шапошников [и др.] // Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - В 2 Ч. -Ч. 1. – Самара: СГАУ, 2006. — С. 218-219.

6. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Наука, 1981. – 720 с.

7. Дьяконов, В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ [Текст] / В.П. Дьяконов. - М.: Наука, 1987. – 240 с.

PROCESSING SPEKL IMAGES USING PSEUDO-INTERFEROGRAMS

© 2012 Yu. D. Shcheglov

Samara State University

Sequence of operations in the offered interactive mode of quantitative interpretation of the spekl-interferograms received at static or dynamic loading of elements of a design is considered.

Spekl-interferogram, reperry point, spline interpolation, basic line, spline surface.

Информация об авторах

Щеглов Юрий Денисович, ведущий инженер кафедры «Оптика и спектроскопия», Самарский государственный университет. Область научных интересов: лазерные контрольно-измерительные системы, программные методы и средства обработки информации.

Shcheglov Yury Denisovich, leading engineer of chair «Optics and spectroscopy», Samara state university. Area of research: laser control and measuring systems, program methods and means of processing of information.