

05;12

Жесткие повороты пластины и смещения спеклов в области ее изображения

© А.П. Владимиров, Д.О. Попов

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: var@imach.uran.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2003 г.

Дано описание установки, собранной для проверки теоретических положений о смещении спеклов в области изображения поверхности, совершающей вращательные движения. Показано, что в целом экспериментальные данные согласуются с теорией. Выявлены линейная связь между поворотом поверхности и смещением спеклов, а также линейная зависимость чувствительности метода от расстояния между линзой и плоскостью наблюдения.

Введение. После создания лазеров исследователи обратили внимание на эффекты смещения и изменения спеклов при смещениях, деформациях и поворотах шероховатой поверхности. Они были обобщены в работе I. Yamaguchi [1], где теоретически была изучена связь между малыми перемещениями, поворотами, деформациями поверхности и динамикой спеклов. Указанные явления в более общей постановке задачи были изучены А.П. Владимировым в работе [2]. На основе модели трехмерного диффузора, обоснованного в [3], была выявлена связь между поступательными перемещениями, деформациями и поворотами элементов трехмерного тонкого объекта и смещениями спеклов в области его изображения. Для компоненты вектора перемещения спеклов A_y в окрестности некоторой точки наблюдения, согласно [2], имеем

$$A_y(\mathbf{u}_0, \Omega, \varepsilon) = m u_{y0} + \frac{Z}{L_0} \left\{ (m u_{y0} - u_{y0}) + L_0 \left[(\varepsilon_{xy} - \Omega_z) \cdot \mathbf{I}_{sx} + \varepsilon_{yy} \mathbf{I}_{sy} + (\varepsilon_{yz} + \Omega_x) \cdot (\mathbf{I}_{sz} + 1) + \frac{1}{L_s} u_{x0} \mathbf{I}_{sx} \mathbf{I}_{sy} + \frac{1}{L_s} u_{y0} (\mathbf{I}_{sy}^2 - 1) + \frac{1}{L_s} u_{z0} (\mathbf{I}_{sy} \mathbf{I}_{sz}) \right] \right\}, \quad (1)$$

где m — увеличение линзы, \mathbf{I}_{sx} , \mathbf{I}_{sy} , \mathbf{I}_{sz} — компоненты единичного вектора, направленного от объекта к источнику излучения, Z —

расстояние от плоскости изображения до плоскости наблюдения, L'_0 — расстояние от линзы до плоскости изображения, L_0 — расстояние от объекта до линзы, L_s — расстояние от источника излучения до объекта, u_{x0}, u_{y0}, u_{z0} — компоненты вектора поступательного перемещения, $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{yz}$ — компоненты тензора деформации, Ω_z, Ω_x — компоненты тензора жестких поворотов, усредненные по области, равной разрешению линзы.

Если при $m = 1$ плоский объект освещается по нормали параллельным пучком, то в отсутствие поступательного перемещения объекта формула (1) переходит в соотношение

$$A_y = 2 \cdot Z \cdot \omega_x, \quad (2)$$

где $\omega_x = \frac{\partial u_z}{\partial y}$ — угол поворота поверхности вокруг оси ox радианах.

Целью настоящей работы являлась экспериментальная проверка этого соотношения.

Эксперимент. Оптическая система экспериментальной установки приведена на рис. 1. Расстояние от объекта 5 до линзы 9 равнялось 168 mm или двум фокусным расстояниям линзы. Угол между направлениями освещения и наблюдения равнялся 10° . Диаметр диафрагмы 10 равнялся 2.1 mm. Для разных расстояний L от линзы 9 до телекамеры 12 при одних и тех же условиях эксперимента в компьютер 13 были записаны видеофильмы динамики спеклов при вращении пластины в течение 5 s. Скорость вращения равнялась $(1.52 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}$ rad/s. В работе была использована монохромная телекамера типа STA-572, гелий-неоновый лазер ЛГН-207А мощностью 1.6 mW. Для ввода сигналов в компьютер использовалась видеокарта типа miro VIDEO DC30.

Просмотр фильмов показал следующее. Существует положение телекамеры ($L = 182$ mm), при котором спеклы не перемещаются, но имеет место постепенное изменение картины спеклов. Если телекамера располагается ближе или дальше от этого места, то появляется смещение спеклов, эффект смещения увеличивается по мере удаления телекамеры от указанного положения.

Для цифрового анализа указанных эффектов и определения смещения спеклов было использовано программное обеспечение, аналогичное представленному в работе [4]. Программа позволяла оператору выбрать произвольную линию на экране монитора компьютера и частоту захвата кадров для цифровой обработки. Видеосигналы вдоль выбранной линии оцифровывались, изображения объекта вдоль линии, полученные при

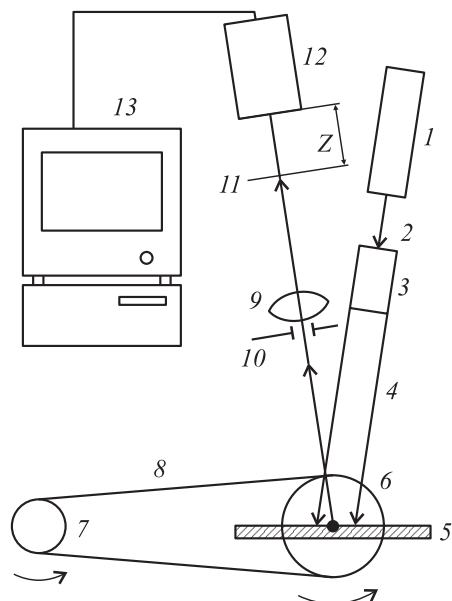


Рис. 1. Оптическая система экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — луч лазера, 3 — коллиматор, 4 — освещающий пучок, 5 — пластина из дюралюминия, 6 — платформа, 7 — вращающаяся колонна, 8 — ременная передача, 9 — линза, 10 — диафрагма, 11 — плоскость изображения, 12 — телекамера, 13 — компьютер.

последующих опросах, располагались сверху вниз. Таким образом, формировалась двумерная картина, позволяющая визуализировать сигналы, изменяющиеся в пространстве (вдоль линии) и во времени. Если спеклы не смещаются, то на картине образуются вертикальные линии. Если имеют место смещения спеклов, то образуются наклонные линии. Смещения спеклов определяли по смещению пика функции

$$B(m) = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^{K/2} [I_1(k) - \bar{I}_1] \cdot [I_2(k+m) - \bar{I}_2],$$

где $I_1 = I_1(n)$ и $I_2 = I_2(n)$ — видеосигналы вдоль выбранной линии для двух разных моментов времени, K — число пикселей в линии,

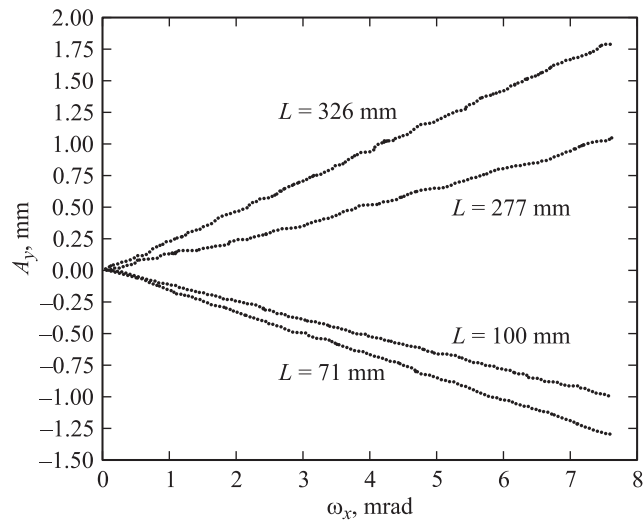


Рис. 2. Типичные зависимости смещения спеклов от угла поворота пластины.

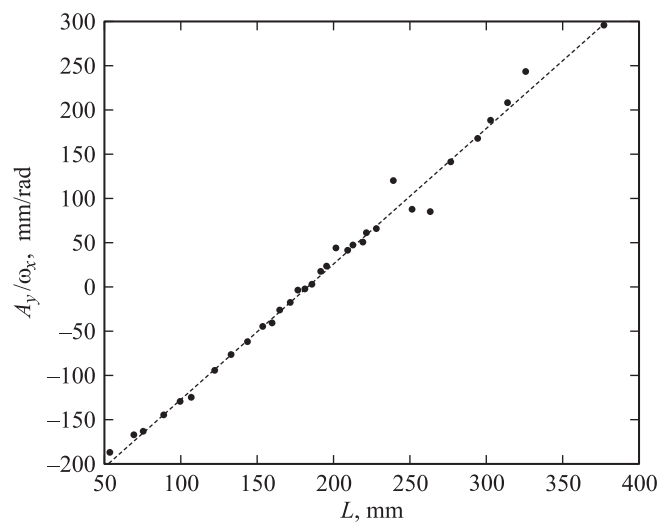


Рис. 3. Зависимость смещения спеклов, приходящегося на единицу угла поворота, от расстояния между линзой и плоскостью наблюдения.

черта сверху означает среднее значение сигналов в линии. На рис. 2 приведены типичные зависимости перемещения спеклов A_y от угла поворота пластины для разных расстояний L от линзы до телекамеры. На рис. 3 приведена зависимость смещений спеклов, приходящих на единицу угла поворота в радианах, от величины L , построенная по полученным данным.

Обсуждение результатов. Полученные в эксперименте данные в целом согласуются с теорией. Имеется положение плоскости наблюдения, где при повороте объекта спеклы не смещаются. Если телекамера располагается ближе или дальше от этого положения, то на экране наблюдается перемещение спеклов. Обнаружена линейная зависимость смещения спеклов от угла поворота. Величина перемещения, приходящегося на единицу угла поворота, также линейно зависит от расстояния между линзой и плоскостью наблюдения, как и предсказывает теория. Однако тангенс угла наклона этой зависимости, равный 1.54 ± 0.03 , не согласуется с теоретическим значением, равным 2. Положение плоскости наблюдения с нулевым смещением спеклов также отличается от положения, предсказанного теорией, на величину, равную 21 мм. Причина указанных расхождений, возможно, связана с тем, что диафрагма 10 на рис. 1 располагалась на расстоянии 12.3 мм от плоскости, проходящей через середину линзы. В теории данное обстоятельство не учитывалось. Кроме того, положение плоскости объекта и плоскости изображения при увеличении, равном единице, определялись визуально в отсутствие диафрагмы. При малой диафрагме указанные положения могли отличаться. На рис. 3 при изменении L от 240 до 264 имеются два существенных выпада от линейной зависимости. Причина этого авторам не ясна. Возможно, они связаны с несовершенством техники эксперимента. В связи с этим необходимы дальнейшие, более точные измерения.

Выводы. На основе данных, полученных авторами на экспериментальной установке, можно сделать следующие выводы.

При направлениях освещения и наблюдения объекта, близких к нормали поверхности, в области изображения поверхности, совершающей вращательное движение, имеется плоскость наблюдения, в которой смещение спеклов отсутствует.

Если плоскость наблюдения сдвигается вдоль оптической оси от указанного положения, то имеет место смещение спеклов, знак смещения зависит от направления сдвига.

Обнаружена линейная зависимость смещения спеклов от угла жесткого поворота.

Перемещение спеклов на единицу угла поворота линейно зависит от величины сдвига плоскости наблюдения.

Вышеуказанные закономерности согласуются с теорией. Вместе с тем положение плоскости наблюдения с нулевым смещением спеклов, а также чувствительность метода отличаются от значений, предсказанных теоретически.

Список литературы

- [1] *Yataguchi I.* // *Optica Acta.* 1981. V. 28. P. 1359–1376.
- [2] *Владимиров А.П.* Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых объектов. Дис. . . . докт. техн. наук. Екатеринбург, 2002. 393 с.
- [3] *Владимиров А.П.* // *ЖТФ.* 1998. Т. 68. № 12. С. 59–63.
- [4] *Vladimirov A.P., Galkin E.N.* // *Proc. of SPIE.* 2002. V. 4705. P. 173–177.