

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 535.31 : 53.082.5

С. В. Михляев

*(Новосибирск)*ТРИАНГУЛЯЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследованы условия применимости триангуляционного метода измерений для активного зондирования нестационарной поверхности с узкой диаграммой рассеяния зондирующего излучения. Показано, что метрологические характеристики сенсора зависят от диапазона измерения, угла триангуляции, направления нормали к поверхности, степени дефокусировки оптической системы и ее апертурных ограничений. Существенными являются также алгоритмы обработки световых распределений и статистического анализа результатов измерений. Определены условия линейного воспроизведения формы поверхности, при нарушении которых возможны лишь статистические оценки ее основных параметров.

Введение. Триангуляционные оптические измерения, благодаря своей дистанционности, бесконтактности и высокой точности, находят широкое применение в самых различных областях для определения размеров, контроля перемещений, анализа формы поверхностей и т. д. В основу этих методов положено формирование зондирующего светового пятна (пятен) на объекте и выделение информации о расстоянии до его поверхности из характеристик отраженного или рассеянного света. Анализ триангуляционных методов зондирования стационарной поверхности посвящено много работ. Метрологические характеристики триангуляционных измерителей, полученные в этих условиях, зависят от множества факторов, в том числе от схемных решений и характеристик освещения [1–4], структуры и формы зондируемой поверхности [5], способов обработки выходных световых распределений [6, 7]. Фундаментальные ограничения на чувствительность когерентных триангуляционных датчиков накладывает спекл-шум [4, 7, 8].

В настоящей работе исследуются условия применимости триангуляционного метода измерений для зондирования нестационарной поверхности с узкой диаграммой рассеяния зондирующего излучения. Примерами таких поверхностей могут служить поверхность жидкости в условиях вибраций или других возмущений, а также поверхность твердого тела с переменным профилем и соответствующими оптическими характеристиками, перемещающаяся относительно триангуляционного сенсора.

$w \ll D$, где D – размер апертуры объектива. Расстояния d_1 и d_2 связаны условием оптического сопряжения $1/d_1 + 1/d_2 = 1/F$.

Измеряя положение светового пятна в выходной плоскости x' , можно найти искомую координату поверхности h :

$$h = x'(d_1 - F)/(2F \sin(\alpha)). \quad (1)$$

Соотношение (1) соответствует случаю плоской горизонтальной поверхности, нормаль \mathbf{n} к которой в точке зондирования M коллинеарна оси z . При наклоне поверхности на угол β (нормаль \mathbf{n}_1 на рис. 1) смещение светового пятна будет определяться выражением

$$\Delta = x'_1 - x' = FV \operatorname{tg}(2\beta)/(1 - F/d_1), \quad (2)$$

где

$$V = h \cos(2\alpha)/d_1 \cos(\alpha). \quad (3)$$

Погрешность измерений, обусловленная наклоном поверхности, зависит от координаты h и определяется из соотношений (1)–(3):

$$\Delta h_\beta = h \operatorname{tg}(2\beta)/\operatorname{tg}(2\alpha). \quad (4)$$

Как следует из выражений (2)–(4), инвариантность результатов измерений к наклону поверхности достигается лишь при определенном угле зондирования $\alpha = \pi/4$. Следует отметить, что за счет наклона выходной плоскости измерителя может быть обеспечена инвариантность к изменению β и при $\alpha \neq \pi/4$, но в этом случае, как уже отмечалось, возникают нелинейные искажения масштаба по оси z и в плоскости фоторегистрации [3].

Для поверхности, профиль которой описывается функцией $h = f(x)$, справедливо соотношение

$$\operatorname{tg}(2\beta) = -2f'(x)/[1 - (f'(x))^2], \quad (5)$$

где $f'(x)$ – производная функции $f(x)$.

Из формул (1)–(5) следует, что результат определения профиля поверхности $f_1(x)$ по измеренным данным отличается от исходной функции $f(x)$ вследствие нелинейных искажений, обусловленных вариациями наклона поверхности в точке зондирования:

$$f_1(x) = f(x) \{1 - 2f'(x)/[(1 - (f'(x))^2) \operatorname{tg}(2\alpha)]\}. \quad (6)$$

Соотношения (4)–(6) определяют ограничения на профиль поверхности, который может быть проанализирован рассматриваемым методом, в зависимости от угла зондирования и допустимого уровня искажений.

Апертурные ограничения. Рассмотрим влияние конечных размеров апертуры объектива на результаты измерений триангуляционным датчиком. Основные эффекты, связанные с апертурой, – это ограничение углов отклонения и виньетирование зондирующего светового пучка. Эти эффекты приводят к снижению диапазона и увеличению погрешности измерений. Для пучков конечной ширины важны оба эффекта, в то время как для узких пучков основное значение имеет ограничение углов отклонения.

Предельные углы отклонения $\varphi^{\pm} = \max(2\beta)$ зондирующего пучка (см. рис. 1) ограничиваются размерами апертуры и расположением объектива относительно поверхности. Из рис. 1 можно получить соотношение

$$\operatorname{tg} \varphi^{\mp}(h) = \mp \frac{D}{2d_1} \frac{1 \mp 4h \sin(\alpha)/D}{1 - V}, \quad (7)$$

где V задается выражением (3), а знак определяется направлением отклонения луча от оптической оси системы. Диапазон измерений для узкого зондирующего пучка ($w \ll D$) при $\beta = 0$ задается условием $|h| < D/4 \sin(\alpha)$.

Соотношение (7) накладывает ограничения на вариации профиля поверхности в соответствии с (5) при $\varphi = 2\beta$.

Для нестационарной поверхности метрологические характеристики триангуляционного датчика определяются в результате статистической обработки данных. Диапазон измерений при этом может увеличиться, но одновременно возрастут и погрешности измерений. Ограничимся в дальнейшем рассмотрением эргодических процессов, когда время измерения и статистической обработки данных существенно меньше характерного времени изменения статистических характеристик поверхности. В этом случае усреднение по времени может быть заменено усреднением по пространству, а временные функции – на функции от пространственных координат.

Из рис. 1 и соотношений (2), (3) следует, что

$$\Delta = Kx'', \quad (8)$$

где x'' – координата в плоскости объектива, а $K = \frac{F}{d_1 - F} \frac{V}{1 - V}$.

Вводя апертурную функцию

$$P_D(x'', y'') = \begin{cases} 1, & \sqrt{x''^2 + y''^2} \leq D/2; \\ 0, & \sqrt{x''^2 + y''^2} > D/2, \end{cases}$$

для среднего значения $\langle \Delta \rangle$ из (8) и рис. 1 можно получить выражение

$$\langle \Delta \rangle = K \langle x'' \rho(x'', y'') P_C(x'', y'') P_D(x'' - 2h \sin \alpha, y'') \rangle / R(h, \alpha, C, D),$$

где $\rho(x'', y'')$ – плотность распределения вероятности случайных величин x'', y'' ; $P_C(x'', y'')$ – область определения функции $\rho(x'', y'')$;

$$R(h, \alpha, C, D) = \langle \rho(x'', y'') P_C(x'', y'') P_D(x'' - 2h \sin \alpha, y'') \rangle$$

– вероятность попадания светового пучка в апертуру объектива, определяющая время измерения. Для равномерного распределения в пределах круга диаметром C имеем $\rho(x'', y'') = 4/(\pi C^2)$. Графики $\langle \Delta \rangle$ для этого случая при различных соотношениях D и C приведены на рис. 2, откуда следует, что при $C < D$ существует диапазон изменения h , при котором $\langle \Delta \rangle$ пренебрежимо мало. Погрешности измерений в остальных случаях зависят как от геометрических параметров измерителя, так и от статистических характеристик поверхности, приводящих к флуктуациям отраженного зондирующего пучка.

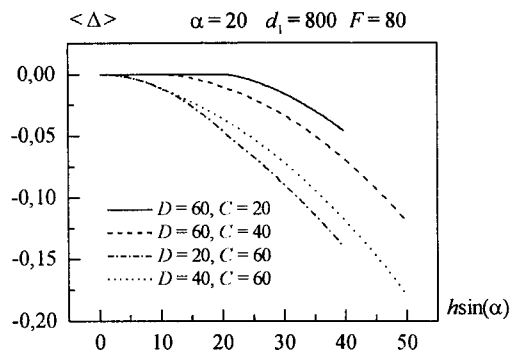


Рис. 2. Среднее смещение $\langle \Delta \rangle$ положения светового пятна в выходной плоскости для равномерного распределения $\rho(x'', y'') = 4/(4\pi C^2)$

Виньетирование. При конечной ширине светового пучка следует учитывать эффекты, связанные с его возможным виньетированием апертурой объектива. Поскольку при виньетировании могут возникать значительные погрешности измерений, необходимо указать способ идентификации подобных граничных ситуаций. Рассмотрим такой способ, основанный на контроле энергии зондирующего пучка.

Пусть интенсивность зондирующего светового пучка в плоскости объектива описывается гауссовой функцией с параметрами смещения x_0 и ширины w :

$$I(x, y, x_0, w) = \exp[-((x - x_0)^2 + y^2)/w^2].$$

Изменение энергии пучка в результате виньетирования определяется выражением

$$Q(x_0, w, D) = \iint I(x, y, x_0, w) P_D(x, y) dx dy. \quad (9)$$

Виньетирование вызывает искажение светового распределения в выходной плоскости измерителя и приводит к появлению погрешностей измерений. При отсутствии дефокусировки искажения проявляются в анизотропном уширении светового распределения без смещения его центра. С увеличением дефокусировки характер искажений существенно меняется: на выходе измерителя формируется френелевское изображение апертуры объектива, что приводит к изменению вычисляемого положения светового пятна и появлению погрешностей измерений. Уровень погрешностей при этом зависит от алгоритма, используемого при обработке регистрируемого светового распределения $I'(x)$.

Приведем оценки погрешностей измерений для двух способов определения x -координаты светового пятна: по медиане (Δ_m) и центру тяжести светового распределения (Δ_t), определяемым выражениями

$$2 \int Y(x - \Delta_m) I'(x) dx = \int I'(x) dx, \quad \Delta_t = \int I'(x) x dx / \int I'(x) dx,$$

где $Y(x) = 1$ при $x < 0$ и $Y(x) = 0$ при $x \geq 0$.

Ограничимся приближением геометрической оптики, когда дефокусировка приводит только к изменению масштаба светового распределения. В

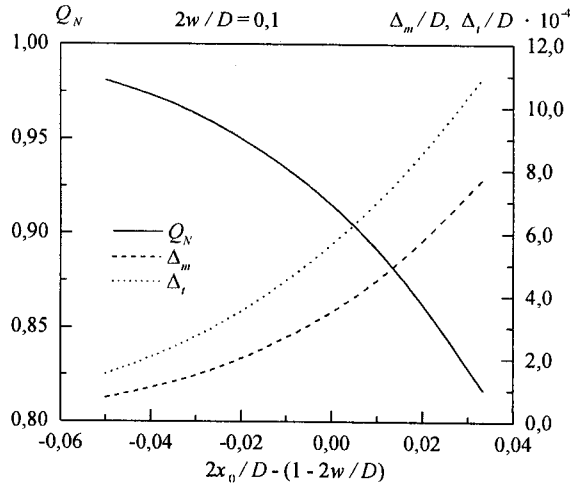


Рис. 3. Виньетирование гауссова светового пучка: Q_N – нормированная энергия; x_0 – смещение пучка по апертуре объектива; Δ_m , Δ_t – смещение пучка в выходной плоскости, определяемое по медиане и центру тяжести светового распределения соответственно

этом случае если $I(x, y)$ – интенсивность светового распределения в плоскости объектива, то на расстоянии d от него интенсивность пропорциональна $I(Mx, My)$, где $M = |1 - d/d_2|$.

На рис. 3 показаны графики изменения относительных погрешностей измерений Δ_m/D , Δ_t/D и графики нормированной функции (9) в зависимости от относительного смещения светового пятна $2x_0/D - (1 - 2w/D)$. Из приведенных зависимостей определяется допустимый уровень вариации энергии оптического сигнала, обусловленной виньетированием, при котором погрешность измерений не превышает заданного значения. В частности, при изменении энергии сигнала на 10% и $M = 0,1$ наименьшая из приведенных погрешностей (Δ_m/D) не превышает $4,2 \cdot 10^{-4}$ для $2w/D = 0,1$. Для $2w/D = 0,5$, как показывают расчеты, эта погрешность не превышает $1,3 \cdot 10^{-3}$. Для получения более точных соотношений между энергией пучка и погрешностью измерений следует использовать экспериментально полученные зависимости, учитывающие параметры зондирующего пучка и характеристики реальных объективов.

Результаты моделирования. Рассмотрим волнистую поверхность, описываемую гармонической функцией

$$f(x) = h \sin(kx) + h_0. \quad (10)$$

В соответствии с (5) результатом измерения будет

$$f_1(x) = \left[1 - 2 \operatorname{ctg}(2\alpha) \frac{kh \cos(kx)}{1 - (kh)^2 \cos^2(kx)} \right] [h \sin(kx) + h_0] \quad (11)$$

при ограничениях (7) для $h = f(x)$.

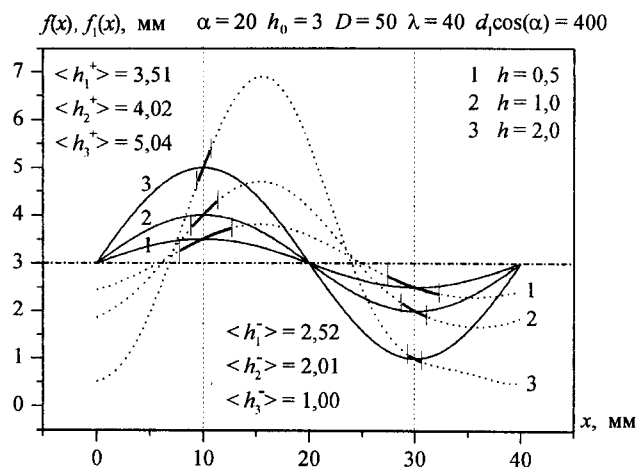


Рис. 4. Профили поверхности: $f(x)$ – исходный профиль (сплошная кривая); $f_1(x)$ – профиль без учета апертурных ограничений (пунктирная кривая). Выделенные участки – измеренный профиль с учетом апертурных ограничений

Уровень искажений зависит от соотношений между длиной волны $\lambda = 2\pi/k$, ее амплитудой h и постоянной составляющей h_0 . При $kh \ll 1$ относительная погрешность определения профиля не превышает величины $2kh/\text{tg}(2\alpha)$. При больших значениях kh погрешность может быть значительной. Это иллюстрируется рис. 4, где показаны графики функций (10), (11) для различных значений kh . Апертура объектива при этом играет роль режекторного фильтра с полосой пропускания, определяемой условиями (7). Результат действия такого фильтра для фрагментов положительной и отрицательной полуволн $f(x)$ изображен жирной линией. При больших значениях h_0 и kh для определения профиля поверхности необходимо учитывать угол наклона нормали к поверхности в точке зондирования. При отсутствии такой информации возможны лишь статистические оценки основных параметров поверхности – средних значений профиля поверхности $\langle f_1 \rangle$ и амплитуды поверхностных волн $\langle h^+ \rangle, \langle h^- \rangle$. На рис. 4 приведены соответствующие значения, слабо отличающиеся от средних для выбранных значений параметров. При увеличении h и h_0 погрешность заметно возрастает: $\langle h^+ \rangle = 13,27, \langle h^- \rangle = 7,05, \langle f_1 \rangle = 10,16$ при $h_0 = 10, h = 3$. Возникающие при этом погрешности измерений (отличие $\langle f_1 \rangle$ от h_0 и $\langle h^+ \rangle, \langle h^- \rangle$ от $h_0 \pm h$), обусловленные нелинейной характеристикой углового фильтра (7), при необходимости могут быть снижены путем дополнительной узкополосной фильтрации. Такая фильтрация осуществляется установкой диафрагмы S (см. рис. 1) в задней фокальной плоскости объектива. Размер диафрагмы Δ_F определяется допустимыми угловыми отклонениями светового пучка $\Delta\varphi = 2\beta: \text{tg}(\Delta\varphi) < \Delta_F/2F$ – или, согласно (4), допустимым уровнем погрешности измерений $\Delta_F < 2F \times \text{tg}(2\alpha)\Delta h_\beta/h$. Заметим, что при $\Delta\varphi \ll 1$ имеет место бимодальное распределение результатов измерений, соответствующих локальным областям зондирования в окрестностях экстремумов поверхностной волны. В этом случае диапазон измерений приближается к диапазону, определенному выше для узкого зондирующего пучка, но время измерений может существенно возрасти вследствие увеличения вероятности блокирования пучка диафрагмой.

Заключение. Непосредственное использование триангуляционных методов измерений для анализа нестационарной поверхности возможно либо при определенных углах триангуляции и соответствующих им углах наклона плоскости наблюдения, либо (для поверхности с узкой диаграммой рассеяния зондирующего излучения) при малых вариациях направления нормали к поверхности в точке зондирования, ограничиваемых геометрией схемы измерения. В остальных случаях возможны лишь статистические оценки профиля поверхности. Возникающие при этом погрешности измерений определяются параметрами системы, статистическими свойствами поверхности и в общем случае приводят к ограничению диапазона измерений.

Для контроля степени виньетирования зондирующего пучка и режекции связанных с этим результатов измерений с большими погрешностями может быть использован энергетический контроль регистрируемого светового потока. Этот прием успешно применялся нами при испытаниях триангуляционного измерителя в составе установки для выращивания кристаллов [9].

Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации метрологических характеристик триангуляционных схем (включая схемы с наклонной плоскостью регистрации), применяемых для зондирования нестационарных поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rioux M.** Laser range finder based on synchronized scanners // Appl. Opt. 1984. **23**, N 21. P. 3837.
2. **Hausler G., Ritter D.** Parallel three-dimensional sensing by color-coded triangulation // Appl. Opt. 1993. **32**, N 35. P. 7164.
3. **Rioux M., Bechthold G., Taylor D., Duggan M.** Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision // Opt. Eng. 1987. **26**, N 12. P. 1245.
4. **Dremel W., Hausler G., Maul M.** Triangulation with large dynamical range // Optical Techniques for Industrial Inspection // Proc. SPIE. 1986. **665**. P. 182.
5. **Вертопрахов В. В.** Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений // Автометрия. 1995. № 6. С. 64.
6. **Плотников С. В.** Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Там же. С. 58.
7. **Varibeau R., Rioux M.** Influence of speckle on laser range finders // Appl. Opt. 1991. **30**, N 20. P. 2873.
8. **Hausler G., Herrmann J.** Physical limits of 3D-sensing // Proc. SPIE. 1992. **1822**. P. 150.
9. **Mikhlyayev S. V., Nezhevenko E. S.** A computer vision system to control the process of crystal growth // Pattern Recognition and Image Analysis. 1999. **9**, N 1. P. 156.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
E-mail: mikhlyayev@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
23 мая 2000 г.*