

**С. В. Михляев***(Новосибирск)***АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ  
СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРОФИЛЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Анализируются две основные схемы лазерных триангуляционных измерителей, применяемые для зондирования зеркальной поверхности с наклонной (удовлетворяющей принципу Шеймпфлюта) и ортогональной к оптической оси плоскостями фоторегистрации. Даны оценки погрешностей измерений и сравнительный анализ метрологических характеристик двух схем. Определены условия применимости принципа Шеймпфлюта. Показано, что при определенных соотношениях между параметрами оптической схемы и расходимостью светового пучка схема с ортогональной плоскостью фоторегистрации, несмотря на наличие дефокусировки, может обеспечить меньший уровень погрешности измерений, чем схема с наклонной плоскостью. Это преимущество может иметь место лишь при малых углах наклона зондируемой поверхности. Рассмотрены особенности применения триангуляционных систем для зондирования нестационарной поверхности.

**Введение.** Оптическая триангуляция широко применяется в научных исследованиях и в самых различных областях промышленности для измерения расстояний до анализируемой поверхности и определения ее профиля. В основном используются два типа триангуляционных сенсоров: в первом выходная плоскость сенсора ортогональна его оптической оси (сенсор с ортогональной плоскостью (ОП)), во втором – наклонена к ней под определенным углом в соответствии с принципом Шеймпфлюта (сенсор с наклонной плоскостью (НП)) [1–3]. Наклон выходной плоскости позволяет исключить дефокусировку оптической системы и увеличить диапазон измерений. Наиболее заметно эти преимущества проявляются при зондировании диффузной поверхности.

Для зеркальной поверхности или поверхности с узкой диаграммой рассеяния погрешность измерений в ОП-сенсоре существенным образом зависит от расходимости зондирующего светового пучка и наклона зондируемой поверхности [4–6].

В предлагаемой работе исследуются условия применимости принципа Шеймпфлюта при зондировании зеркальной поверхности. Показано, что при определенных соотношениях между параметрами оптической схемы и расходимостью светового пучка схема с ортогональной плоскостью фоторегистрации может обеспечить меньший уровень погрешности измерения, чем схема с наклонной плоскостью, несмотря на наличие дефокусировки.

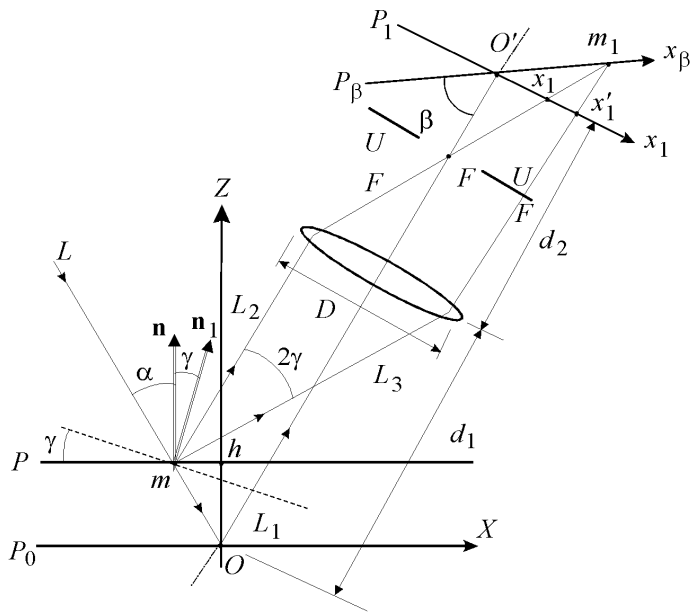


Рис. 1. Схема триангуляционных измерений

Существенно, что это преимущество может иметь место лишь при малых углах наклона зондируемой поверхности.

Рассмотрено влияние наклона поверхности на погрешность измерений, исследованы особенности триангуляционного зондирования нестационарной поверхности. Получены соотношения, связывающие параметры поверхностных волн на зондируемой поверхности с геометрией схемы измерения и определяющие линейный диапазон измерения триангуляционного сенсора, в котором возможно корректное вычисление статистических параметров, характеризующих профиль поверхности, по результатам измерений.

**Принцип измерений.** Принцип триангуляционных измерений поясняет рис. 1. Зондирующий световой пучок падает на исследуемую отражающую поверхность  $P_0$  (плоскость  $z=0$ ) под углом  $\alpha$ , так что его центральный луч  $L$  пересекает поверхность в точке  $x=y=0$ . Отраженный луч  $L_1$  совпадает с оптической осью триангуляционного измерителя, установленного под углом  $\alpha$  к координатной оси  $Z$ . Выходная плоскость измерителя  $P_1$  либо перпендикулярна оптической оси, либо наклонена под углом  $\beta$  ( $P_\beta$ ) в соответствии с условием Шеймпфлюта [1–3]. В последнем случае вне зависимости от высоты рельефа поверхности точка зондирования оказывается оптически сопряженной с соответствующей точкой выходной плоскости, что позволяет исключить погрешности измерений, связанные с дефокусировкой. Объектив измерителя установлен так, что расстояния  $d_1$  и  $d_2$  удовлетворяют условию оптического сопряжения:  $1/d_1 + 1/d_2 = 1/F$ , где  $F$  – фокусное расстояние объектива. В результате отраженный луч  $L_1$  попадает в начало координат (точка  $O$ ) выходной плоскости измерителя  $P_1$ .

При изменении координаты  $z$  точки пересечения зондирующего луча с поверхностью на величину  $h$  (точка  $m$  поверхности  $P$ ) координата  $x_1$  отраженного луча  $L_2$  в плоскости  $P_1$  изменяется:

$$x_1 = 2h M \sin \alpha, \quad (1)$$

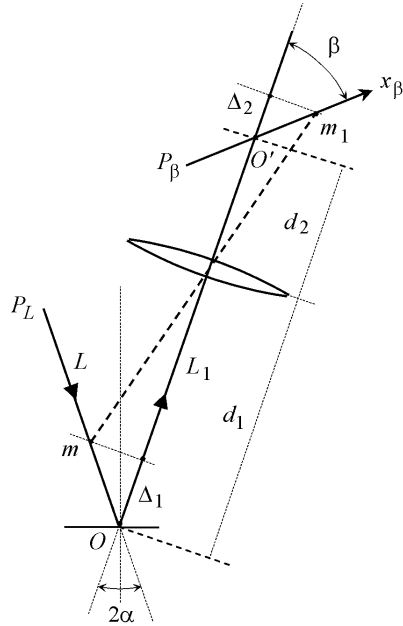


Рис. 2. Схема измерений, удовлетворяющая принципу Шеймпфлюта

где  $M = d_2/d_1$  – увеличение оптической системы.

При выполнении условия Шеймпфлюта выходная плоскость измерителя  $P_\beta$  наклоняется к его оптической оси на угол  $\beta$  (рис. 2) в соответствии с условием  $\text{tg} 2\alpha = M \text{tg} \beta$ . Плоскость  $P_L$ , проходящая через зондирующий луч  $L$ , оказывается при этом оптически сопряженной с выходной плоскостью  $P_\beta$ , поэтому любая точка зондирования  $m$  проецируется в плоскость расположения фоторегистрирующего устройства (точка  $m_1$ ) без какой-либо дефокусировки. Координата точки  $m_1$  определяется выражением

$$x_\beta = \Delta_2 / \cos \beta, \quad (2)$$

где  $\Delta_2 = M^2 \Delta_1 / (1 - M \Delta_1 / F)$ ,  $\Delta_1 = h \cos 2\alpha / \cos \alpha$ .

Погрешности измерения высоты рельефа поверхности определяются погрешностями измерения координат отраженного светового луча в плоскостях фоторегистрации  $P_1$  и  $P_\beta$ . Из (1), (2) следует, что

$$\Delta h_1 = \Delta x_1 / (2 M \sin \alpha), \quad (3)$$

$$\Delta h_\beta = \Delta x'_\beta (1 - M \Delta_1 / F)^2 \cos \alpha / (M \cos 2\alpha \sqrt{M^2 + \text{tg}^2 2\alpha}), \quad (4)$$

где  $\Delta x'_\beta = \Delta x_\beta / \sin \beta$ .

Погрешности измерения положения светового пятна, в свою очередь, зависят от выбора способа измерения, параметров сигнала и фотоприемного устройства.

**Оценка погрешностей измерений.** Оценку погрешностей измерений для двух рассматриваемых оптических систем проведем при следующих предположениях.

1. Интенсивность зондирующего светового пучка описывается гауссовым распределением

$$I(x, y) = (\pi \sigma^2)^{-1} \exp(-(x^2 + y^2) / \sigma^2), \quad (5)$$

где ширина пучка  $\sigma$  зависит от координаты  $\xi$  вдоль его оси:

$$\sigma(\xi) = \sigma_0 [1 + (\lambda \xi / \pi \sigma_0^2)^2]^{1/2}. \quad (6)$$

2. Отношение сигнал/шум, равное  $N$  и определяемое динамическим диапазоном сигнала и фотоприемного устройства, ограничено:  $N \leq I_{\max} / \Delta I$ , где

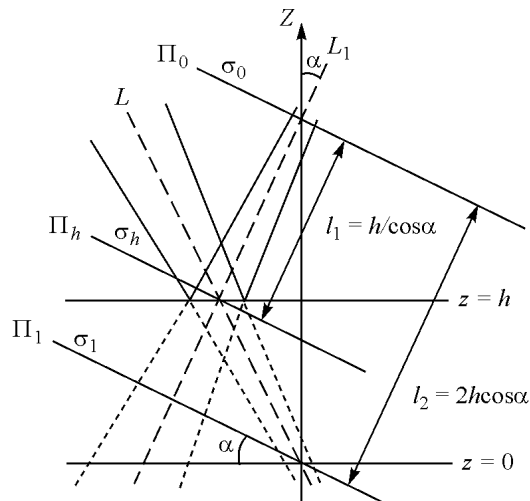


Рис. 3. Геометрия зондирующего гауссова пучка при отражении его от плоскости  $z = h$

$I_{\max}$  – максимальное значение сигнала при выбранной схеме и заданном диапазоне измерений.

3. Размер фотоприемника  $\Delta_f$  пренебрежимо мал ( $\Delta_f \ll \sigma_0$ ).

4. Координаты светового пятна определяются по положениям фронтов соответствующего ему сигнала в точках максимальной чувствительности.

В соответствии с пп. 2, 4 погрешность определения координаты находится из выражения  $\Delta x = I_{\max} / NI'_x$ , где  $I'_x$  – производная по  $x$ .

Для гауссова пучка (4) в точках максимального значения производных  $x_m = \pm \sigma / \sqrt{2}$  имеем

$$\Delta x = \pi I_{\max} c \sigma^3, \quad (7)$$

где  $c \approx 1,2/N$ .

Для получения требуемых оценок необходимо в (7) подставить значения параметров  $I_{\max}$  и  $\sigma$ , соответствующих рассматриваемым схемам измерений. Для этого обратимся к рис. 3, где показана геометрия зондирующего гауссова пучка, плоскость перетяжки которого проходит через точку  $x = y = z = 0$ , при отражении его от плоской поверхности  $z = h$ .

Размеры светового пучка  $\sigma_0, \sigma_h, \sigma_1$  в плоскостях  $\Pi_0, \Pi_h, \Pi_1$ , ортогональных оси оптической системы, задаются с учетом (6) соотношениями:

$$\sigma_0 = \sigma(0), \quad \sigma_h = \sigma(h/\cos\alpha), \quad \sigma_1 = \sigma(2h\cos\alpha).$$

Максимальные значения сигналов для двух рассматриваемых схем измерений согласно (5) определяются выражениями

$$I_\beta(h) = (\pi (M_h \sigma_h)^2)^{-1}, \quad (8)$$

$$I_1(h) = (\pi (M \sigma_1)^2)^{-1}, \quad (9)$$

где  $M_h = M/(1 - M\Delta_1)/F$ . Из (8), (9) можно найти соотношения для максимальных значений сигналов:

$$I_{\max}^1 = \max \{I_1(0)\} = 1/\pi \sigma_0^2 M^2, \quad (10)$$

$$I_{\max}^\beta = \max \{I_\beta(h)\} = I_\beta(h_0) = \frac{1 + (\pi \sigma_0^2 / \lambda)^2 (M \cos 2\alpha / F)^2}{\pi \sigma_0^2 M^2}, \quad (11)$$

где

$$h_0 = -(\pi \sigma_0^2 / \lambda)^2 M \cos 2\alpha \cdot \cos \alpha / F. \quad (12)$$

Оценки погрешностей измерений получаются из (3), (4) с использованием (10) и (11):

$$\Delta h_1 = c \sigma_0 (1 + (\lambda / \pi \sigma_0^2)^2 4h^2 \cos^2 \alpha)^{3/2} / 2 \sin \alpha, \quad (13)$$

$$\Delta h_\beta = c \sigma_0 (1 + (\lambda h / \pi \sigma_0^2 \cos \alpha)^2)^{3/2} (1 + (\pi \sigma_0^2 M \cos 2\alpha / \lambda F)^2) / K, \quad (14)$$

где

$$K = 2 \sin \alpha (1 - M h \cos 2\alpha / F \cos \alpha).$$

Выражение (13) не зависит от увеличения системы  $M$ , что объясняется выбранной нормировкой оптического сигнала на максимальное значение. Выражение (14) соответствует неограниченному диапазону измерений. Для линзы с апертурой  $D$  диапазон измерений ограничен условием

$$|h| \leq h_D = D / 4 \sin \alpha, \quad (15)$$

поэтому максимальное значение сигнала должно выбираться в пределах этого диапазона:

$$\tilde{I}_{\max}^\beta = \begin{cases} I_\beta(h_0) & \text{при } |h_0| \leq h_D; \\ I_\beta(-h_D) & \text{при } h_0 < -h_D \quad (\alpha < \pi/4); \\ I_\beta(h_D) & \text{при } h_0 > h_D \quad (\alpha > \pi/4), \end{cases} \quad (16)$$

где  $h_0$  определяется выражением (12). Соотношение (14) с учетом (16) преобразуется к виду

$$\Delta h_\beta = \pi c \sigma_0^3 M^2 \tilde{I}_{\max}^\beta (1 + (\lambda h / \pi \sigma_0^2 \cos \alpha)^2)^{3/2} / K. \quad (17)$$

Выражения (13), (17) дают искомые оценки погрешностей измерений для двух рассматриваемых случаев в зависимости от параметров триангуляционных измерителей и геометрии схемы измерений.

**Влияние наклона зондируемой поверхности на результаты измерений.** Предельные углы наклона  $\gamma$  определяются высотой рельефа поверхности и апертурой линзы. Для таких углов в схеме с наклонной плоскостью фоторегистрации результаты измерений не зависят от наклона поверхности.

В схеме с ортогональной плоскостью фоторегистрации влияние дефокусировки может быть значительным, что может привести к необходимости ограничения диапазона допустимых углов наклона поверхности.

Погрешность определения координаты светового пучка в плоскости  $P_1$  при наклоне поверхности в точке зондирования на угол  $\gamma$  можно представить согласно (1) в виде

$$\Delta x' = \Delta x_1 + \Delta x_1^\gamma = 2M \sin \alpha \Delta h_1^\gamma, \quad (18)$$

где  $\Delta x_1$  соответствует условию  $\gamma = 0$  (погрешность определения положения светового пятна), а  $\Delta x_1^\gamma$  – смещение пятна за счет наклона поверхности. Можно показать, что

$$\Delta x_1^\gamma = Mh \operatorname{tg} 2\gamma \cdot \cos 2\alpha / \cos \alpha. \quad (19)$$

Используя (18) и (19), получим оценку для погрешности измерений

$$\Delta h_1^\gamma = \Delta x' / 2M \sin \alpha = \Delta h_1 + h \operatorname{tg} 2\gamma / \operatorname{tg} 2\alpha, \quad (20)$$

где  $\Delta h_1$  определяется выражением (13).

Как следует из выражения (20), с увеличением  $\gamma$  ошибка измерений быстро возрастает и может стать недопустимо большой, поэтому сенсор с ортогональной к оптической оси плоскостью фоторегистрации используется лишь при небольших углах наклона зондируемой поверхности. Для ограничения ошибок измерений, вызываемых наклоном зондируемой поверхности, в оптическую систему сенсора может быть введен низкочастотный фильтр (диафрагма  $UU$  на рис. 1), блокирующий отраженные зондирующие световые пучки с недопустимо большими углами наклона. В этом случае обеспечивается более точное измерение  $z$ -координат поверхности, но лишь в локальных областях, соответствующих малым значениям  $\gamma$ .

**Зондирование нестационарной поверхности.** Предыдущие результаты получены в предположении стационарности анализируемой поверхности. Рассмотрим теперь нестационарный случай, когда нормаль к поверхности  $\mathbf{n}$  в точке зондирования и расстояние  $z$  между этой точкой и плоскостью установки сенсора являются функциями времени, т. е.  $\mathbf{n} = \mathbf{n}(x, y, t)$ ,  $z = z(t)$ . Ограничимся в дальнейшем рассмотрением эргодических процессов, когда время измерения и статистической обработки данных существенно меньше характерного времени изменения статистических характеристик поверхности. В этом случае вместо усреднения по времени будем использовать усреднение по пространству, а вместо временных функций – функции от пространственных координат.

Нестационарность поверхности приводит к вариациям угла отклонения отраженного зондирующего пучка, вызывает его виньетирование апертурой объектива и может служить причиной дополнительных погрешностей измерений. Параметры поверхности в этом случае могут быть определены лишь после статистической обработки результатов измерений. Основные особенности зондирования нестационарной зеркальной поверхности сенсором с ортогональной к оси выходной плоскостью изложены в работе [4]. Погрешность измерений в таком сенсоре определяется в соответствии с (20) наклоном поверхности. Апертура объектива при этом играет роль режекторного углового фильтра, ограничивающего возможные предельные углы отклоне-

ния  $\varphi^{\mp}$  отраженного зондирующего пучка, а значит, и наклона поверхности:

$$\operatorname{tg} \varphi^{\mp}(h) = \mp \frac{D}{2d_1} \frac{1 \mp 4h \sin \alpha / D}{1 - h \cos 2\alpha / d_1 \cos \alpha}. \quad (21)$$

Профиль поверхности в результате может быть определен лишь в локальных областях или зонах видимости сенсора, соответствующих полосе пропускания фильтра (21). Заметим, что для триангуляционных схем с ортогональной и наклонной выходными плоскостями зоны видимости сенсора одни и те же, поскольку ограничения на допустимые углы наклона поверхности в этих схемах одинаковы и определяются координатой  $z$  точки зондирования и апертурой объектива. Погрешности измерений при этом существенно различаются, так как в схеме с НП отсутствует составляющая погрешности, связанная с наклоном поверхности. Расположение зон видимости на поверхности, как следует из (21), зависит от  $h$ , причем существенно нелинейно, поэтому смещения поверхности по координате  $z$  могут приводить к искажениям зон видимости, заметным изменениям в их расположении и смещении относительно фиксированного профиля поверхности. Это необходимо учитывать при статистических оценках параметров поверхности, вычисляемых лишь по фрагментам ее профиля в этих зонах, а не по всему профилю зондируемой поверхности.

Заметим, что при зондировании нестационарной поверхности эффективный диапазон измерений, определяемый предельно допустимыми углами отклонения зондирующего пучка (21), может существенно превышать соответствующий показатель для стационарной плоской поверхности, задаваемый соотношением (15). Однако в этом случае из зоны видимости сенсора исключаются фрагменты поверхности с небольшими наклонами, например области вблизи гребней или впадин поверхностных волн.

Рассмотрим в качестве примера, аналогично [4], поверхность, профиль которой описывается гармонической функцией

$$h = f_0(x) = h_a \sin(kx) + h_0, \quad (22)$$

где  $k = 2\pi/\lambda_a$ ,  $\lambda_a$  – длина поверхностной волны. Если  $T(x, h, \lambda_a)$  – апертурная функция, соответствующая условию (21) и зависящая от исходного профиля (22), то профили поверхности  $g_0(x)$  и  $g_1(x)$ , определяемые по измерениям сенсоров с ОП и НП, записываются в виде

$$g_0(x) = f_0(x)T(x, h, \lambda_a); \quad g_1(x) = f_1(x)T(x, h, \lambda_a), \quad (23)$$

где

$$f_1(x) = \left[ 1 - 2 \operatorname{ctg} 2\alpha \frac{kh_a \cos(kx)}{1 - (kh_a)^2 \cos^2(kx)} \right] [h_a \sin(kx) + h_0] \quad (24)$$

– результат измерения сенсором с ОП без учета апертурных ограничений [4].

Если профиль поверхности задается функцией  $f(x)$ , то угол отклонения отраженного зондирующего пучка  $2\gamma$  определяется соотношением

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

где  $f'(x)$  – производная функции  $f(x)$ . Для поверхности (22) в точках максимального отклонения пучка  $x = x_{\max}$  выражение (21) преобразуется к виду  $\operatorname{tg} \varphi^{\mp}(h) = \operatorname{tg} \varphi^{\mp}(h_0)$ , откуда при условиях  $h_0/d_1 \ll 1$ ,  $D/2d_1 \ll 1$  можно получить оценку

$$|h_a/\lambda_a| < (D - D_0)/8\pi d_1, \quad (25)$$

где  $D_0 = 4|h_0|\sin\alpha$  – эффективный размер апертуры, соответствующий диапазону измерений  $\pm h_0$  при зондировании плоской горизонтальной поверхности.

Условие (25) определяет соотношение между параметрами волны (22) и геометрией схемы измерений, при котором точки поверхности  $x = x_{\max}$ , вызывающие максимальное отклонение пучка, находятся в зоне видимости сенсора. В этом случае в зоне видимости оказываются также склоны волны и ее экстремумы, если их высота не выходит за диапазон измерений сенсора (15):  $h_a + |h_0| < h_D$ . Таким образом, выполнение условия (25) определяет линейный диапазон измерения сенсора, в котором обеспечивается возможность реконструкции функций (22), (24) во всей области определения и соответственно дальнейшего корректного вычисления любых статистических параметров профиля поверхности по результатам измерений. В случае невыполнения этого условия значения функций (22), (24) могут быть получены лишь в зонах видимости и возможности определения по полученным данным каких-либо статистических параметров поверхности существенным образом зависят от расположения зон видимости в области определения этих функций и от выбранной схемы сенсора.

В случае более сложного профиля поверхности, описываемого некоторой функцией распределения по амплитудам и длинам волн  $P(h_a, \lambda_a)$ , статистические оценки параметров поверхности должны основываться на результатах измерений (23) с учетом этих распределений. В частности, среднее значение профиля поверхности может быть получено из выражения

$$\langle h \rangle_i = \frac{\int g_i(x, h, \lambda_a) P(h_a, \lambda_a) dx dh_a d\lambda_a}{\int T(x, h, \lambda_a) dx dh_a d\lambda_a}, \quad i=0,1. \quad (26)$$

Заметим, что при  $kh_a \ll 1$  из (24), (26) следует  $\langle h \rangle_0 = \langle h \rangle_1 = h_0$ , хотя отличия функции  $g_0(x)$  от истинного профиля могут быть значительными. Существенно большей может быть и дисперсия функции  $g_0(x)$  по сравнению с  $g_1(x)$ , поэтому при невыполнении указанного условия или при недостаточном усреднении результатов измерений погрешность определения среднего значения профиля в схеме с ОП может оказаться недопустимо большой.

**Результаты моделирования.** Для получения количественных оценок метрологических характеристик триангуляционных сенсоров с наклонной и ортогональной к оптической оси плоскостями фоторегистрации использовались численные расчеты.

На рис. 4 приведены графики отношения погрешностей измерений (13), (17):

$$R(h) = \Delta h_1 / \Delta h_B, \quad (27)$$



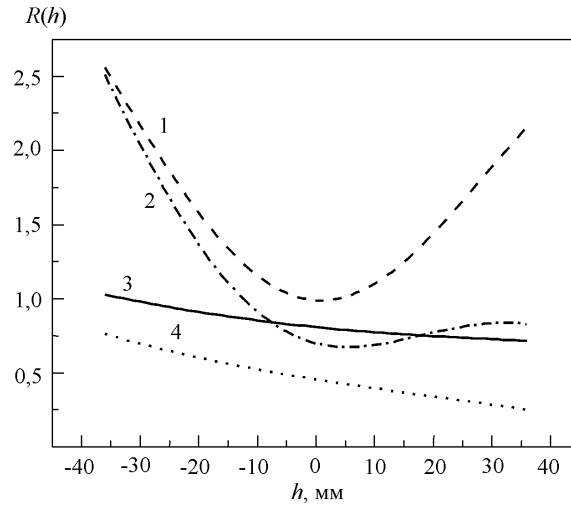


Рис. 4. Отношение погрешностей измерений для различных значений параметров оптических систем:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\sigma_0 = 0,1$ ,  $M = 0,2$  (кривая 1);  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\sigma_0 = 0,1$ ,  $M = 1,2$  (кривая 2);  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\sigma_0 = 0,2$ ,  $M = 0,6$  (кривая 3);  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\sigma_0 = 0,2$ ,  $M = 1,2$  (кривая 4)

для различных значений параметров при  $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ ,  $D = 50$ ,  $F = 70$  мм,  $N = 50$ . Из графиков видно, что в зависимости от значений параметров отношение погрешностей (27) может быть как больше, так и меньше 1. В частности, при  $\sigma_0 = 0,2$  мм,  $M = 1,2$  и  $\alpha = 20^\circ$  погрешность измерений в схеме с ортогональной плоскостью фоторегистрации оказывается меньше, чем в схеме, удовлетворяющей условию Шеймпфлюта. Абсолютные значения погрешностей измерений показаны на рис. 5 при  $\alpha = 20^\circ$ .

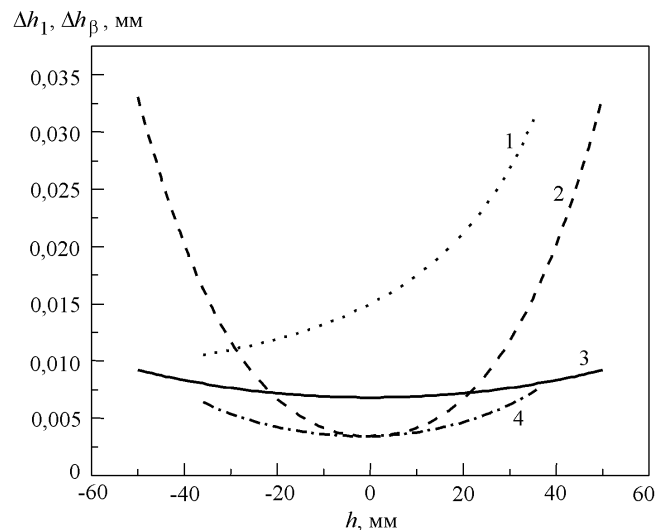


Рис. 5. Погрешности измерений триангуляционных сенсоров в зависимости от высоты  $h$  рельефа зондируемой поверхности для различных значений параметров оптических систем:  $\sigma_0 = 0,2$ ,  $M = 1,2$ ,  $\beta = 35,0$  (кривая 1);  $\sigma_0 = 0,1$  (кривая 2);  $\sigma_0 = 0,2$  (кривая 3);  $\sigma_0 = 0,1$ ,  $M = 0,2$ ,  $\beta = 76,6$  (кривая 4)

Заметим, что для получения более точных оценок погрешностей измерений триангуляционных сенсоров может быть учтено искажение гауссова светового распределения, связанное с наклоном и формой зондируемой поверхности. Учет этого эффекта, как следует из [7], дает поправки к результатам измерений второго порядка малости.

Необходимо отметить, что полученные результаты относятся к случаю плоской поверхности с фиксированным направлением нормали. Если в процессе измерения происходят значительные изменения наклона поверхности, то в схеме с ортогональной выходной плоскостью это может привести к большим погрешностям измерений. Тем не менее при определенных условиях эта схема может быть использована для корректного определения основных статистических характеристик профиля нестационарной поверхности [4].

На рис. 6–11 представлены данные, моделирующие результаты зондирования триангуляционными сенсорами тестовой поверхности (22). При моделировании вычислялись функции профиля (23), (24) и средние значения (26) для различных схем измерений, а также максимальные  $\mu$  и среднеквадратичные  $\sigma$  отклонения результатов измерений:

$$\mu = \max |\theta(x)| = \max |g_0(x) - g_1(x)|, \quad \sigma^2 = \frac{\int (\theta(x) - \langle \theta(x) \rangle)^2 dx}{\int T(x, h, \lambda_a) dx}.$$

Везде при расчетах, если не оговорено особо, использовались следующие значения параметров:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $D = 50$  мм,  $H = d_1 \cos \alpha = 400$  мм,  $\lambda_a = 100$  мм.

На рис. 6 представлены результаты моделирования, соответствующие максимально возможной для линейного диапазона измерений амплитуде волны  $h_a$ . Средние значения функций в этом диапазоне дают несмещенную оценку уровня поверхности  $\langle g_0(x) \rangle = \langle g_1(x) \rangle = h_0$ , хотя ошибки измерения

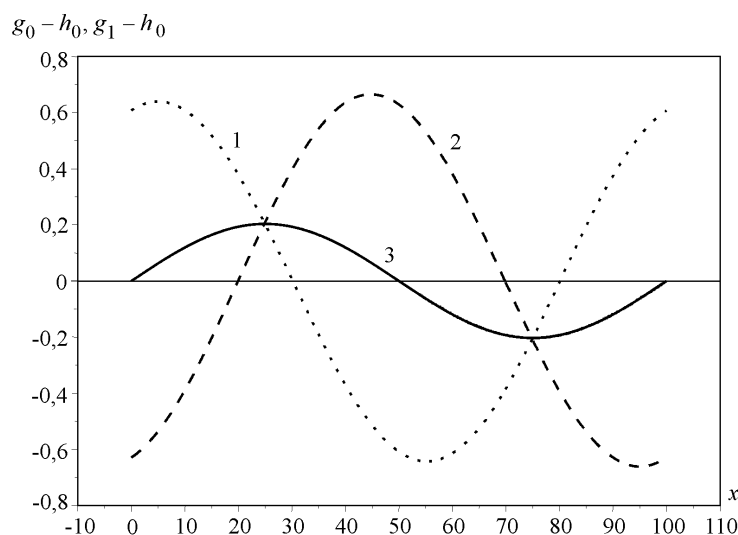


Рис. 6. Профили поверхности, измеряемые триангуляционными сенсорами с НП ( $g_1(x)$ ) и ОП ( $g_0(x)$ ) при максимально возможной для линейного диапазона амплитуде волны  $h_a$  ( $h_a = 0,203$  при  $h_0 = -20$ ,  $h_a = 0,22$  при  $h_0 = 20$ ) и различных значений  $h_0$ :  $g_0 - h_0$  ( $h_0 = -20$ ) (кривая 1);  $g_0 - h_0$  ( $h_0 = 20$ ) (кривая 2);  $g_1 - h_0$  ( $h_0 = -20$ ) (кривая 3)

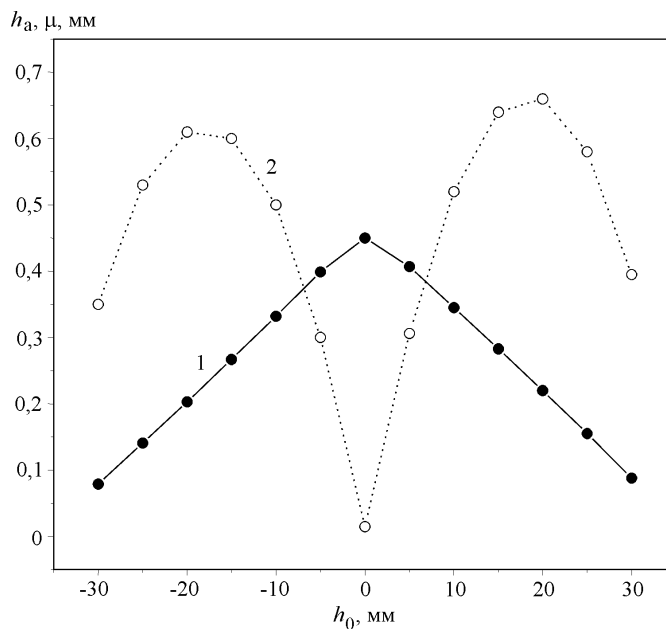


Рис. 7. Зависимости максимально возможной для линейного диапазона измерений амплитуды волны  $h_a$  (кривая 1) и соответствующей ей максимальной разности  $\mu = \max|g_0(x) - g_1(x)|$  (кривая 2) от  $h_0$

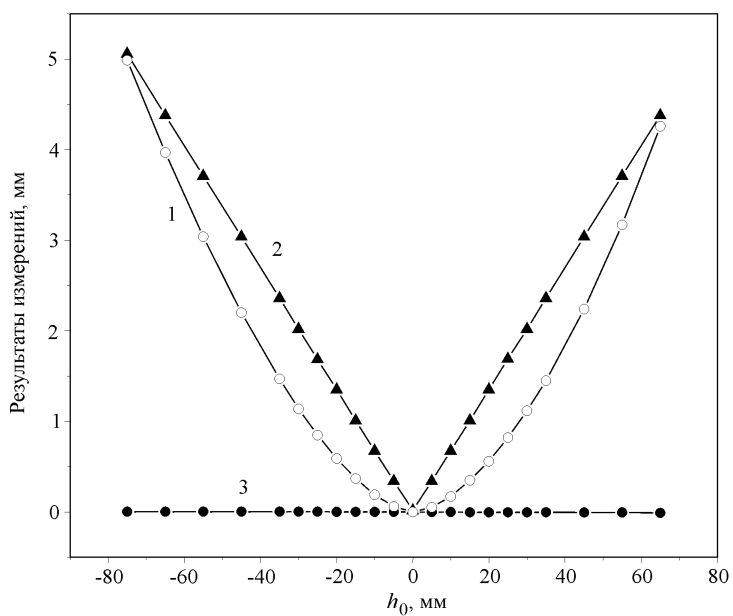


Рис. 8. Зависимости максимальной разности измерений и оценок среднего уровня поверхности от  $h_0$  для амплитуды волны  $h_a = 0,45$ , соответствующей максимально возможному при  $h_0 = 0$  значению для линейного диапазона измерений:  $\langle g_0 \rangle - h_0$  (кривая 1);  $\mu$  (кривая 2);  $\langle g_1 \rangle - h_0$  (кривая 3)

профиля для схемы с ОП весьма значительны и существенно превышают амплитуду волны:  $\mu = 0,66$ ,  $\sigma = 0,47$  для  $h_0 = 20$ .

Результаты расчетов предельно допустимой амплитуды волны, хорошо согласующиеся с оценкой (25), приведены на рис. 7. Здесь же представлена максимальная разность измерений сенсоров  $\mu$ . Уменьшение  $\mu$  для двух рассматриваемых схем при приближении  $h_0$  к границам диапазона (15) объясняется соответствующим уменьшением допустимой амплитуды волны и приближением формы зондируемой поверхности к плоскости.

На рис. 8 показаны расчеты среднего уровня поверхности, а также максимальной разности измерений  $\mu$ . При отклонении  $h_0$  от нулевого значения максимальная разность  $\mu$  и ошибка определения среднего значения уровня в схеме с ОП существенно возрастают, в то время как для схемы с НП эта ошибка остается пренебрежимо малой. Последнее обстоятельство связано с малым значением амплитуды волны, в результате чего изменения зон видимости не приводят к заметным изменениям среднего значения уровня для схемы с НП. Характер нелинейных искажений измеряемого профиля в схеме с ОП, а также изменения зон видимости датчика при различных  $h_0$  для этого случая иллюстрирует рис. 9. Утолщенные участки на кривых соответствуют зонам видимости, определяемым условием (21).

При невыполнении условия (25) и значительном увеличении параметров  $kh_a$  или  $|h_0|$  погрешность измерения среднего уровня волны может заметно возрасти. Данное обстоятельство связано с возможной существенной асимметрией в расположении зон видимости относительно гребней и впадин вол-

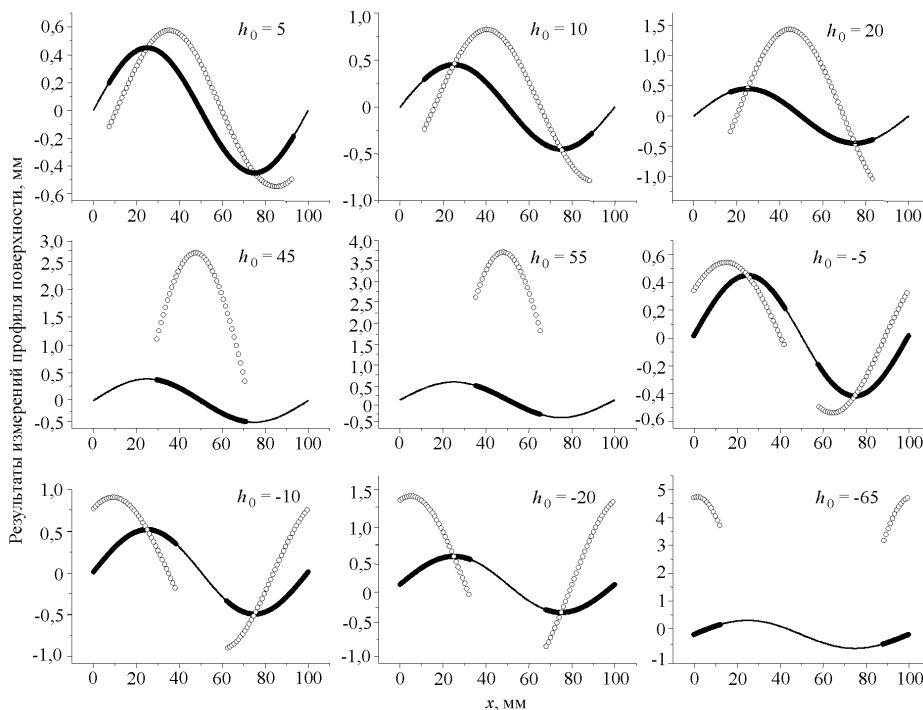


Рис. 9. Профили волновой поверхности  $g_0(x)$  и  $g_1(x)$  для  $h_a = 0,45$  мм, соответствующие зонам видимости датчика при различных значениях  $h_0$  (утолщенные участки –  $g_1 - h_0$ ; светлые кружки –  $g_0 - h_0$ ; сплошные линии –  $f_0 - h_0$ )

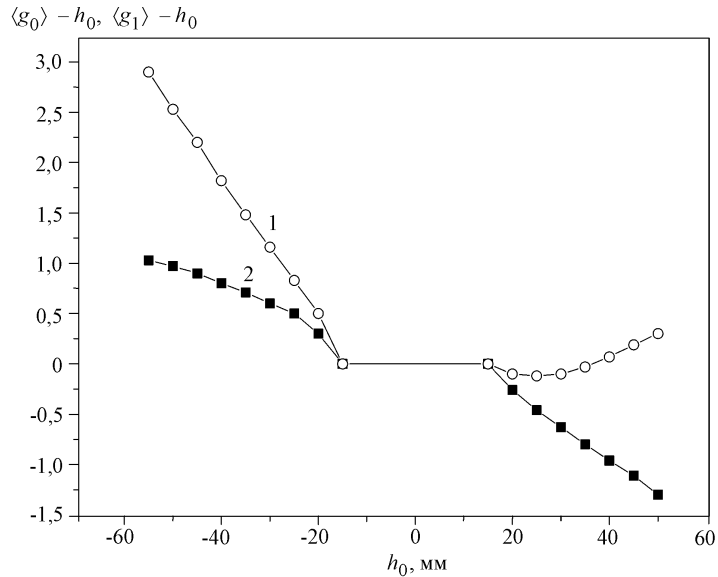


Рис. 10. Зависимости ошибки измерения среднего уровня поверхности от  $h_0$  при  $h_a = 5$  мм,  $\lambda_a = 2000$  мм:  $\langle g_0 \rangle - h_0$  (кривая 1);  $\langle g_1 \rangle - h_0$  (кривая 2)

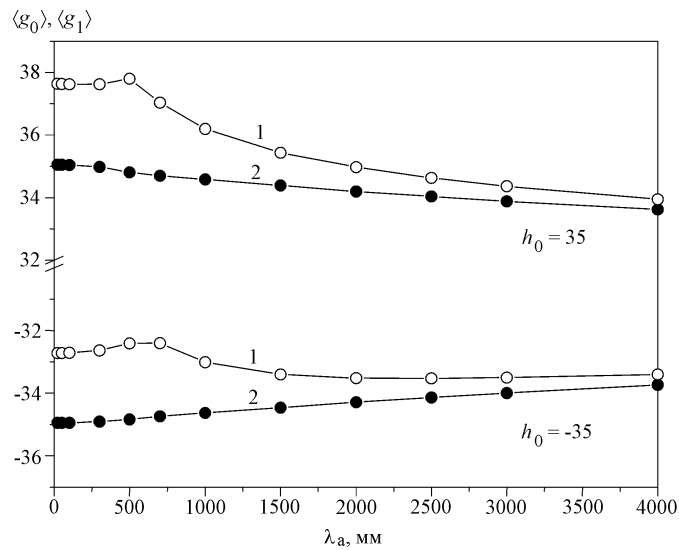


Рис. 11. Зависимости измеряемого среднего уровня поверхности от длины волны  $\lambda_a$  при  $h_a = 5$  мм вблизи границ диапазона измерений  $h_0 = \pm 35$  мм:  $\langle g_0 \rangle$  (кривые 1),  $\langle g_1 \rangle$  (кривые 2)

ны и приводит к получению смещенной оценки среднего значения. Это относится как к схеме с ОП, так и к схеме с НП и иллюстрируется графиками рис. 10, 11, где приведены зависимости погрешностей измерения среднего уровня от  $h_0$  и от длины поверхностной волны соответственно. Фрагменты графиков с нулевой погрешностью соответствуют значениям  $h_0$ , удовлетворяющим условию (25).

**Заключение.** В триангуляционных схемах, удовлетворяющих принципу Шеймпфлюта, отсутствует дефокусировка, но имеют место нелинейные изменения масштаба вдоль направления зондирования, влияющие на точность

измерений. В свою очередь, как показано в данной работе, в сенсорах с ортогональной выходной плоскостью погрешности измерений существенным образом зависят от расходимости зондирующего светового пучка и наклона зондируемой поверхности. Учет этих факторов позволяет сделать вывод о том, что при зондировании зеркальной поверхности или поверхности с узкой диаграммой рассеяния и при определенных соотношениях между параметрами схемы измерений и расходимостью светового пучка сенсор с выходной плоскостью, ортогональной оптической оси, может иметь преимущества по точности измерений в сравнении со схемой, удовлетворяющей принципу Шеймпфлюта. Эти преимущества могут иметь место лишь при малых углах наклона зондируемой поверхности. В остальных практически важных случаях следует использовать схемы измерений с наклонной плоскостью фоторегистрации.

Для зондирования нестационарной зеркальной поверхности могут использоваться сенсоры обоих типов, апертурные ограничения и диапазоны измерений для них одинаковы. Что касается погрешностей измерений, то для сенсора с наклонной плоскостью фоторегистрации они могут быть существенно ниже, поскольку в такой схеме измерений отсутствуют какие-либо нелинейные искажения профиля зондируемой поверхности в отличие от схемы с ортогональной к оптической оси плоскостью фоторегистрации.

В линейном диапазоне измерений, характеризующемся отсутствием виньетирования отраженных от поверхности зондирующих пучков апертурой объектива, схема с наклонной плоскостью фоторегистрации обеспечивает возможность точной реконструкции профиля поверхности и вычисления любых статистических характеристик поверхностных волн. Схема с ортогональной к оптической оси плоскостью фоторегистрации в этих условиях может быть использована лишь для получения оценок среднего уровня поверхности, причем для получения несмещенных оценок может потребоваться существенно большее количество измерений по сравнению со схемой, соответствующей принципу Шеймпфлюта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baribeau R., Rioux M.** Influence of speckle on laser range finders // *Appl. Opt.* 1991. **30**, N 20. P. 2873.
2. **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.
3. **Amann M.-C., Bosch T., Lescure M. et al.** Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement // *Opt. Eng.* 2001. **40**, N 1. P. 10.
4. **Михляев С. В.** Триангуляционное зондирование нестационарной поверхности // *Автометрия.* 2001. № 1. С. 67.
5. **Mikhlyayev S. V.** Laser triangulation systems for sensing mirror surface // *Proc. SPIE.* 2002. **4900**. P. 519.
6. **Baba M., Ohtani K., Imai M., Konishi T.** New laser rangefinder for three-dimensional shape measurement of specular objects // *Opt. Eng.* 2001. **40**, N 1. P. 53.
7. **Вергопрахов В. В.** Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений // *Автометрия.* 1995. № 6. С. 54.