

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

1999

УДК 531.715.2

И. В. Голубев, С. В. Плотников
(Новосибирск)

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ**

Предложен новый способ снижения погрешности триангуляционного измерителя расстояний, основанный на применении структурированного зондирующего пучка. Приводятся результаты его численного моделирования и экспериментальной проверки (на примере структурированного зондирующего пучка, состоящего из трех узких гауссовых пучков). Для тестовых объектов установлено заметное снижение погрешности измерений (до 1,9 раза) по сравнению со стандартной триангуляционной схемой.

Введение. Бесконтактный контроль размеров изделий актуален для многих отраслей современной промышленности: машиностроения, станко-строения, атомной энергетики и др. Среди существующих бесконтактных методов размерного контроля оптико-электронные (теневой, триангуляционный и др.), как известно, обеспечивают высокую точность в широком диапазоне измерений [1]. В дополнение к данному преимуществу триангуляционный метод измерения расстояния до поверхности объекта отличается простотой в реализации. Он предусматривает формирование на контролируемой поверхности светового пятна, получение его изображения (в рассеянном свете) на многоэлементной фотодиодной линейке (ФДЛ) и определение расстояния до поверхности, исходя из положения этого изображения. Сфера практического применения метода достаточно широка. Однако при контроле объектов с так называемыми техническими поверхностями (со следами механической обработки точением, фрезерованием) имеют место значительные погрешности измерений, вызванные локальным отражением и рассеянием зондирующего пучка на микроструктуре поверхности.

В работе предложен новый способ уменьшения указанной составляющей погрешности измерений, основанный на снижении влияния неравномерности рассеяния за счет использования структурированного зондирующего пучка с заданным распределением интенсивности в поперечном сечении. Представлены результаты численного моделирования, а также экспериментальной проверки эффективности предложенного способа.

Триангуляционные измерения с использованием структурированного освещения. Проанализируем сначала основные источники погрешности триангуляционных измерений и возможные способы ее снижения. С этой целью обратимся к рис. 1, поясняющему принцип действия метода.

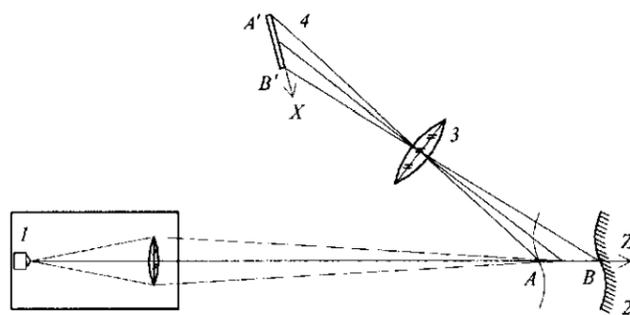


Рис. 1. Схема триангуляционного измерителя: 1 – осветительная система, 2 – поверхность объекта, 3 – проецирующая система, 4 – фотоприемник

Осветительная система 1 создает на поверхности объекта 2 световое пятно. Проецирующая система 3 собирает часть рассеянного шероховатой поверхностью излучения и формирует изображение этого пятна на фотодиодной линейке 4. Таким образом, каждому положению поверхности контролируемого объекта в пределах диапазона измерений (отрезок AB по оси Z) соответствует определенное положение изображения светящегося пятна на ФДЛ (отрезок $A'B'$ по оси X). Следовательно, определив положение x изображения пятна на ФДЛ и зная зависимость $z(x)$, можно вычислить расстояние z до поверхности объекта.

Как известно, погрешность измерений расстояния до поверхности объекта в триангуляционных измерительных системах зависит как от рассеивающих свойств поверхности, так и от параметров схемы. Как показано в [2], при шероховатости поверхности много меньше разрешения проецирующей оптической системы погрешность измерения σ определяется когерентностью зондирующего излучения и разрешением проецирующей оптической системы, причем указанный предел погрешности имеет фундаментальный характер и обусловлен влиянием спеклов.

В реальных системах, как правило, погрешность измерения значительно выше фундаментального предела, что обусловлено влиянием временного и пространственного шумов. Временной шум складывается из случайных шумов оптического и электрического трактов. Его влияние может быть снижено за счет усреднения регистрируемого сигнала по времени. Пространственный шум вызывается в основном неравномерностью рассеяния зондирующего излучения на случайной микроструктуре поверхности, что приводит к искажению изображения пятна на ФДЛ и появлению погрешности δx при определении положения x этого изображения. Особенно высок уровень пространственного шума при измерении расстояний до объектов с техническими поверхностями. В этом случае, вследствие локального отражения и рассеяния на микроструктуре поверхности, наблюдается значительное искажение распределения интенсивности в изображении пятна на ФДЛ.

В [3, 4] предложены различные способы снижения пространственной составляющей погрешности измерений. Первый из них основан на применении двух проецирующих систем, расположенных симметрично относительно направления распространения зондирующего излучения [3]. При этом снижение погрешности (до трех раз) достигается за счет частичной взаимной компенсации погрешностей двух измерительных каналов. Однако такая

система существенно сложнее в настройке и использовании. Второй способ заключается в подборе оптимальной ширины зондирующего пучка. Поскольку пространственная составляющая погрешности связана с неравномерностью рассеяния зондирующего излучения на различных (случайных) участках микрорельефа поверхности, то при увеличении ширины пучка (за счет усреднения по поверхности) можно ожидать снижения погрешности. Однако увеличение ширины зондирующего пучка не приводит к ожидаемому монотонному уменьшению погрешности. Как показано в [4], существует оптимальная ширина пучка, при которой достигается снижение погрешности измерений более чем в два раза.

В предлагаемой работе описан новый способ дальнейшего снижения пространственной погрешности измерений на основе применения структурированного освещения в виде широкого пучка с заданным и более сложным (по сравнению с гауссовым) распределением интенсивности в поперечном сечении. Как уже отмечалось, при увеличении ширины зондирующего пучка с квазигауссовым распределением интенсивности ожидаемого снижения погрешности измерений не наблюдается. Причиной являются значительные локальные вариации рассеивающих свойств контролируемой поверхности (рассеяние на «следах» обработки), приводящие к искажениям профиля интенсивности изображения такого пучка на ФДЛ. Для снижения влияния этих «следов» предлагается, вместо широкого зондирующего пучка с квазигауссовым (низкочастотным) распределением интенсивности (рис. 2, *a*), формировать более высокочастотную пространственную структуру, состоящую, например, из N узких пучков, лежащих вдоль одной линии в плоскости триангуляции (рис. 2, *b*, $N=3$). Если ширину отдельного пучка выбрать большей, чем характерный размер микроструктуры поверхности, то случайные искажения профилей интенсивности изображения пучков на ФДЛ, вызываемые неравномерностью рассеяния, можно считать некоррелированными. Следовательно, при вычислении общей координаты x структуры на ФДЛ через координаты x_n отдельных пучков можно ожидать уменьшения погрешности $\delta x \approx \delta x_n / \sqrt{N}$, где δx_n – погрешности определения координаты отдельного пучка. Очевидно, что снижение погрешности определения коор-

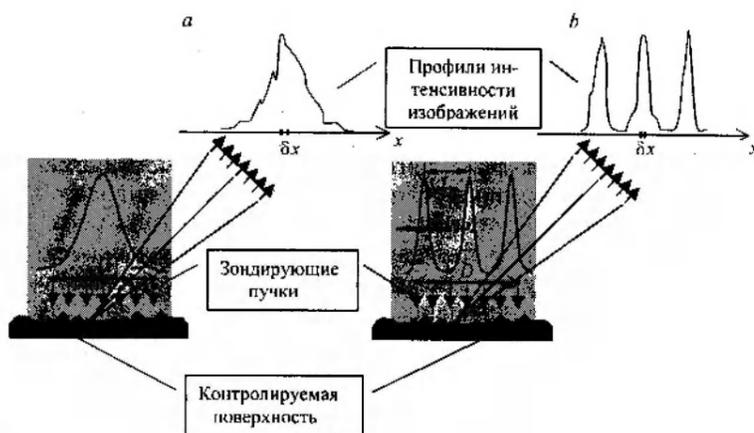


Рис. 2. Распределение интенсивности пучка при широком квазигауссовом зондирующем пучке (а) и структурированном зондирующем пучке (б)

динаты x приводит к соответствующему снижению погрешности измерения расстояния z .

Отметим, что для реализации предложенного способа требуется модернизация осветительной системы традиционной измерительной схемы, не связанная, однако, с ее существенным усложнением. Отметим также, что применение структурированного освещения снижает поперечное (в плоскости поверхности контролируемого объекта) разрешение.

Численное моделирование. На первом этапе проверки предлагаемого способа проводилось численное моделирование работы предложенной схемы. Его цель состояла в сравнении погрешности базовой триангуляционной схемы и погрешности схемы со структурированным зондирующим пучком в виде последовательности гауссовых функций, а также в выборе алгоритмов обработки сигналов, оптимальных с точки зрения точности и быстродействия.

Для расчета сигналов, моделирующих дискретный по координате (1024 элемента) и квантованный по уровню (8 бит) сигнал ФДЛ, использовалась функция $F(x)$ в виде суперпозиции N гауссовых функций шириной d , расположенных на расстоянии L друг от друга:

$$F(x) = \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -4 \left(\frac{x - x_0 + (-1)^n (n-1)L}{d} \right)^2 \right\},$$

где x_0 – координата центра структуры, $d < D/N$ (D – общая ширина структуры), $L \rightarrow (N-1)$ (см. рис. 2).

Далее рассчитывался дискретный по координате сигнал

$$F_1(i) = AF(ih),$$

где $A=180$ – амплитуда сигнала, h – размер элемента дискретизации, $i=0,1,2,\dots,1023$ – номер элемента дискретизации. Отметим, что вычисления производились при различных значениях координаты исходного сигнала x_0 в пределах одного элемента дискретизации.

На этот идеальный сигнал накладывался модельный шум, имеющий мультипликативную и аддитивную составляющие. Мультипликативная составляющая шума моделировала влияние неравномерности рассеяния по поверхности объекта. При этом не учитывались корреляционные свойства шума, т. е. зависимость уровня шума в данной точке от уровней в других точках. Вторая составляющая – аддитивный шум, который моделировал шумы оптического и электронного трактов измерительной системы. В итоге модельный сигнал вычислялся следующим образом:

$$F_2(i) = \text{int}[F_1(i)(1 + r_1(i)) + r_2(i)],$$

где $r_1(i), r_2(i)$ – функции, значениями которых являются случайные величины, распределенные нормально с математическими ожиданиями $\mathbf{M}r_1(i) = \mathbf{M}r_2(i) = 0$ и дисперсиями Δ_1^2 и Δ_2^2 , характеризующими уровень мультипликативного и аддитивного шумов соответственно; $\text{int}[\]$ – целая часть числа.

Далее вычислялись координаты x'_{0j} различных реализаций модельного сигнала (j – номер реализации). При этом с целью повышения точности

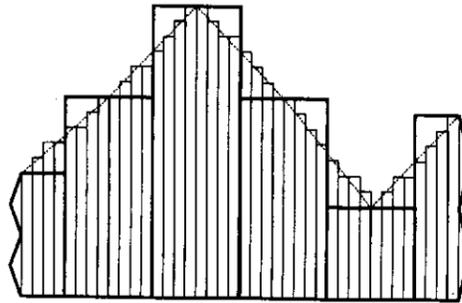


Рис. 3. Дробление дискретного сигнала ФДЛ

последующей обработки сначала производилось дробление дискретного элемента сигнала на k частей ($k = 25-50$) в предположении, что интенсивность между элементами изменяется линейно (рис. 3). Таким образом, функция целочисленного аргумента $F_{2j}(i)$ заменялась на функцию дробного аргумента $F_{2j}(m)$ (где $m = 0, 1/k, 2/k, \dots, 1, 1 + 1/k, \dots, 1023$), имеющую при целых аргументах исходные значения.

Для определения координаты x'_{0j} текущей реализации модельного сигнала использовались два различных алгоритма. Первый из них предусматривает вычисление функции корреляции текущей реализации модельного сигнала F_{2j} и незашумленного (идеального) сигнала F_1 : $K_1(m) = F_{2j}(m) \otimes F_1(m)$, нахождение центрального максимума этой функции и определение координаты медианы ее центрального пика [5], которая и считается искомой координатой x'_{0j} . Согласно второму алгоритму первоначально находим грубое значение координаты x'_{0j} . С этой целью формируется функция $G(m)$ в виде последовательности дельта-функций на расстоянии L друг от друга (как и гауссовы функции идеального сигнала F_1), т. е.

$$G(m) = \sum_{n=0}^N \delta\left(\frac{mh}{k} + (-1)^n nL\right),$$

и вычисляется функция корреляции текущей реализации модельного сигнала F_{2j} с функцией $G(m)$: $K_2(m) = F_{2j}(m) \otimes G(m)$. Далее определяются грубое значение координаты x'_{0j} как точки максимума функции $K_2(m)$ и соответствующие координаты пиков $x_n = (x'_{0j} + (-1)^n nL)$. Затем вычисляются координаты медиан пиков, составляющих распределение, и уточненное значение x'_{0j} как среднее значение $x'_{0j}, x_1 + L, \dots, x_n - (-1)^n nL$.

Как показало моделирование, описанные выше алгоритмы дают схожие результаты в случае, если расстояние между пучками, составляющими структуру, больше их ширины (т. е. пучки не перекрываются). Отметим, что для частично перекрывающихся пучков второй алгоритм дает большую погрешность, тем не менее для дальнейших расчетов (если не оговаривается обратное) используется именно он (в силу более высокой производительности).

Конечным результатом вычислений являлось значение погрешности σ , вызванной наличием аддитивного и мультипликативного шумов, которое

Таблица 1
Погрешности измерений
при различном количестве пучков ($\Delta_1 = 0,2$, $\Delta_2 = 0,02$)

Количество пучков N	Погрешность измерений, мкм	Относительное снижение погрешности
1	3,22	1
2	2,27	1,42
3	1,92	1,68
4	1,66	1,94
5	1,43	2,25
6	1,34	2,40
7	1,23	2,62

находилось из значений координат x'_{0j} случайных реализаций сигналов как среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{\langle (x'_{0j} - x_0)^2 \rangle}$.

Результаты расчета погрешностей по описанной выше методике для сигналов, состоящих из N гауссовых распределений, приведены в табл. 1. Случай $N = 1$ соответствует исходной триангуляционной схеме и используется для сравнения величины полученных погрешностей. Уровни мультипликативного и аддитивного шумов составляют 20 и 2 % соответственно, ширина каждого из N пучков $d = 0,1$ мм, расстояние между пучками $L = 2,5$ мм, размер элемента дискретизации $h = 0,025$ мм. Моделирование распределения, состоящего из восьми и более пучков не проводилось, поскольку практическое использование уже более пяти пучков в структуре сопряжено с рядом трудностей.

Приведенные результаты показывают, что применение структурированного освещения дает снижение погрешности за счет усреднения статистически независимых величин. Как и ожидалось, погрешность убывает пропорционально \sqrt{N} .

Экспериментальная установка и методика определения погрешности измерений. Экспериментальная проверка предложенного способа при контроле реальных объектов проводилась на установке, схема которой представлена на рис. 4. Коллимированный пучок полупроводникового лазера 1 (длина волны 0,66 мкм, мощность 10 мВт) разделяется дифракционной решеткой 2 (период 0,15 мм) на несколько пучков. Диафрагмой 3 выделяется нужное количество пучков, которые затем фокусируются линзой 4 на поверхности объекта 5. Объективом 6 (фокусное расстояние 80 мм, световая апертура 27 мм) на ФДЛ 7 (1024 элемента, шаг 25 мкм) формируется изображение полученных на поверхности объекта световых пятен. Сигнал ФДЛ оцифровывается и передается в ЭВМ для обработки.

В качестве объекта в экспериментах использовались образцы плоской поверхности, различающиеся материалом, шероховатостью и структурой

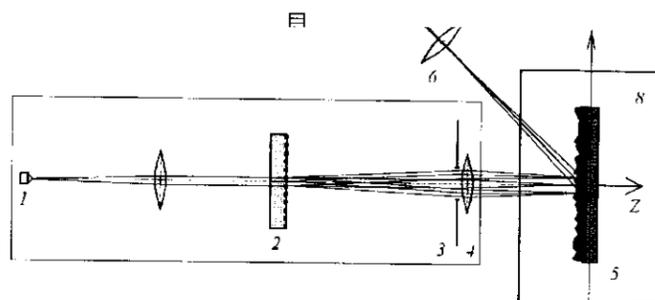


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – дифракционная решетка, 3 – диафрагма, 4 – линза, 5 – контролируемый объект, 6 – объектив, 7 – ФДЛ, 8 – механическая подвижка

поверхности (изотропная и неизотропная). Шероховатость образцов выбиралась близкой к типичной шероховатости поверхности точных изделий машиностроения и находилась в диапазоне R_z от 0,09 до 9,0 мкм. В качестве образцов с неизотропной структурой были выбраны металлические эталоны фрезерованной поверхности различной чистоты обработки, имеющие хорошо различимую периодическую структуру. Что касается образцов изотропной поверхности, то они изготавливались из керамики путем шлифования порошками разной зернистости, дающими различную шероховатость поверхности. Кроме того, на часть подготовленной шлифованием поверхности керамических образцов с целью изменения рассеивающих свойств наносили слой алюминия толщиной 0,15 мкм. Такая толщина слоя при шероховатости более 0,5 мкм практически не изменяет микропрофиль поверхности, но достаточна для изменения рассеивающих свойств.

Объект перемещался при помощи механической подвижки 8 параллельно плоскости поверхности (вдоль оси Y) с шагом 12 мкм, и в каждом положении проводились измерения расстояния z_j до участков поверхности объекта (j – номер шага смещения). Измеряемое расстояние z_j пропорционально координате структуры x_j на ФДЛ. Поскольку расстояние до поверхности объекта при таком способе сканирования оставалось неизменным ($z_j = z = \text{const}$), различия в значениях x_j , вызванные в основном влиянием пространственного шума, характеризуют пространственную составляющую погрешности измерений.

Для определения координат x_j по полученным экспериментальным путем сигналам $F_j(i)$ предварительно вычисляли усредненный сигнал фотодиодной линейки $\langle F(i) \rangle$. Далее, произведя рассмотренную выше операцию дробления дискретных элементов сигнала $\langle F(i) \rangle$ и найдя его функцию автокорреляции, вычисляли экспериментальное значение расстояния L между пучками, необходимое для дальнейших расчетов по второму из приведенных выше алгоритмов.

Таблица 2

Погрешности измерения расстояний до различных поверхностей

Керамическая поверхность	$R_z = 0,84$ мкм	1,4	2,6	1,9
Керамическая поверхность с напылением	$R_z = 0,80$ мкм	2,6	3,8	1,5

Величина погрешности измерений для данной поверхности определялась по совокупности измеренных расстояний до поверхности объекта z , как среднеквадратическое отклонение σ (отклонение среднего значения координаты $\langle z \rangle$ от ее истинного значения относится к погрешностям калибровки и в данной работе не рассматривается).

В соответствии с описанной выше методикой находились значения погрешностей измерений расстояния до поверхности использованных образцов при освещении их тремя пучками, а также одним пучком (в качестве контрольного эксперимента).

Экспериментальные результаты. Проверка предложенного способа проводилась путем сравнения экспериментальных значений погрешности, получаемой для различных тестовых поверхностей при структуре из трех пучков или одного пучка (обычная триангуляционная схема). Полученные значения погрешности измерения расстояния до указанных поверхностей приведены в табл. 2.

Погрешности вычислялись по $j = 100$ измерениям с применением первого из рассмотренных ранее алгоритмов на основе корреляции с незашумленным сигналом, где в качестве незашумленного (идеального) сигнала F_1 в расчетах использовался сигнал $\langle F(i) \rangle$ (рис. 5). Выбор первого алгоритма обусловлен видом сигнала в керамической поверхности, когда нет явного разделения пучков (рис. 5, а).

Как видно из таблицы, наибольшее снижение погрешности (в 1,9 раза) наблюдалось при контроле керамической поверхности. Для керамической поверхности с напылением выигрыш составил 1,5 раза, а для фрезерованной поверхности – 1,2 раза. Отметим, что минимальное снижение погрешности для фрезерованной поверхности может быть вызвано тем, что величина погрешности измерения (4,5 мкм) в этом случае близка к своему минимальному значению – величине шероховатости поверхности (4,22 мкм).

Полученные наборы экспериментальных сигналов $F_j(i)$ ($j = 1, \dots, 100$) для различных поверхностей позволили определить характеристики реального шума. С этой целью вычислялось распределение амплитуды шума от координаты x , для чего сначала выделялась шумовая составляющая $R_j(i) = F_j(i) - \langle F(i) \rangle$, а затем среднее квадратическое отклонение шумовой составляющей $R_{\text{ср}}(i)$ в каждой точке по $X(i = 0, \dots, 1023)$. Сравнение распределения

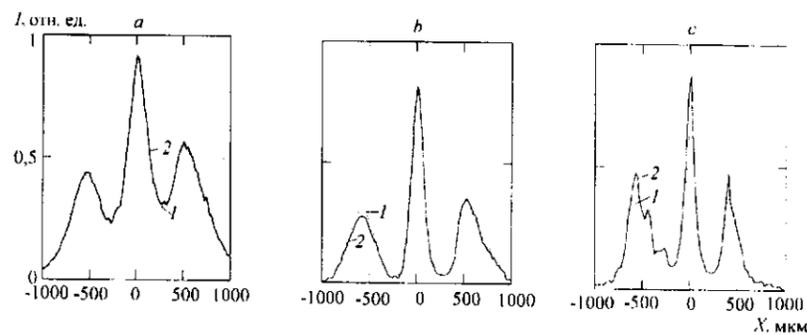


Рис. 5. Распределение интенсивности средних сигналов $\langle F \rangle$ и случайной реализации F_j для различных поверхностей (*a* – керамическая поверхность, *b* – керамическая поверхность с напылением, *c* – фрезерованная металлическая поверхность): $\langle F \rangle$ – средний сигнал (кривая 1), F_j – случайная реализация сигнала (кривая 2)

амплитуды шума по координате $R_{ск}(i)$ (рис. 6) с распределением интенсивности среднего сигнала $\langle F(i) \rangle$ подтверждает предположение о наличии значительной мультипликативной составляющей – более 10 % максимальной интенсивности сигнала. Легко видеть, что уровень шума на керамической поверхности с металлическим покрытием (до 8 %) гораздо выше, чем на керамической поверхности без покрытия (не более 2 %), что объясняется отсутствием равномерного объемного рассеяния. Уровень шума фрезерованной поверхности (12 %) значительно выше шума металлизированной керамической, что, по всей видимости, обусловлено наличием у фрезерованной поверхности определенной структуры, приводящей к явной анизотропии рассеяния и появлению направления, в котором наблюдается блеск, т. е. имеет место рассеяние основной части падающего излучения. При переме-

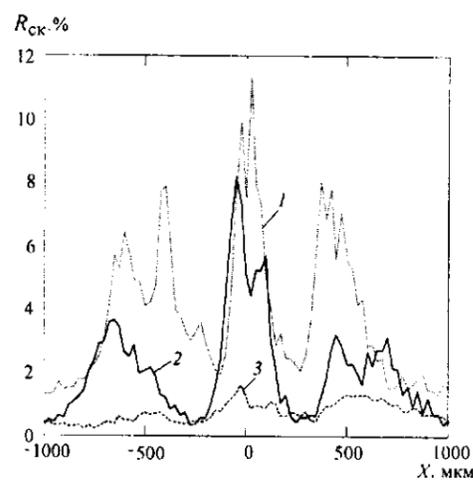


Рис. 6. Распределение средноквадратичного уровня шума (в % от максимальной интенсивности сигнала) по координате X для трех пучков ($N = 3$): кривая 1 – фрезерованная металлическая поверхность, кривая 2 – керамическая поверхность с напылением, кривая 3 – керамическая поверхность

щении такой поверхности относительно измерительной системы положение участков, блеск от которых попадает в апертуру объектива проецирующей системы, постоянно изменяется, что и порождает высокий уровень шума.

Заключение. В работе предложен новый эффективный способ снижения пространственной составляющей погрешности измерений триангуляционных систем, основанный на применении структурированного зондирующего пучка. Путем численного моделирования показано, что для структурированного зондирующего пучка, состоящего из N узких гауссовых пучков, относительное снижение погрешности по сравнению со стандартной триангуляционной схемой достигало \sqrt{N} раз.

Для случая $N = 3$ экспериментально показано, что по сравнению со стандартной триангуляционной схемой ($N = 1$) наибольшее относительное снижение погрешности (в 1,9 раза) наблюдается при контроле изотропной керамической поверхности ($R_z = 0,80$ мкм). Для керамической поверхности с напылением ($R_z = 0,84$ мкм) выигрыш составляет 1,5 раза, а для фрезерованной поверхности ($R_z = 4,22$ мкм) – 1,2 раза. Высказано предположение, что минимальное снижение погрешности для фрезерованной поверхности может быть вызвано тем, что погрешность измерения (4,5 мкм) в этом случае близка к своему минимальному значению – величине шероховатости поверхности.

Экспериментально полученные распределения шума подтверждают наличие значительной мультипликативной составляющей (более 10 %) при измерении расстояния до технической поверхности.

Результаты работы могут быть использованы при создании высокоточных систем промышленного размерного контроля на основе триангуляционного метода измерения.

В заключение авторы выражают благодарность коллективу лаборатории технического зрения КТИ НП СО РАН за поддержку при выполнении данной работы, а также Б. Е. Кривенкову и Ю. В. Чугую за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feutlinske K., Gast Th. Berührungslose optisch-elektrische Prüfung von Lagen und Dimensionen // Qualität und Zuverlässigkeit. 1985. 30, H 7.
2. Dorsch R., Häusler G., Herrmann J. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement // Appl. Opt. 1994. 33, N 7. P. 1306.
3. Kooijman K. S., Horijon J. L. Video rate laser scanner: Considerations on triangulation optics, detectors and processing circuits // Proc. SPIE. 1993. 2065. P. 251.
4. Plotnikov S. V., Volkov E. V. Investigation of probing beam with influence on accuracy of triangulation system measurements // Proc. Intern. Conf. on Measurement. Smolenice Castl, Slovak Republic, 1997. P. 148.
5. Плотников С. В. Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Автометрия. 1995. № 6. С. 58.

Поступила в редакцию 8 октября 1998 г.