

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

© 2004 О. А. Заякин

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Приведены экспериментальные результаты восстановления профилей различных зеркально отражающих поверхностей, в том числе желоба внутреннего кольца шарикоподшипника, имевшего диаметр 18,5 мм. Желоб имел радиус кривизны  $2.86^{+0.04}$  мм, шероховатость  $Ra$  0,05 мм и типичный дефект - гранность, с частотой 12 волн на оборот и высотой, аналогичной  $Rz$  0,4 мкм. Погрешность измерений гранности в эксперименте не превосходила, с вероятностью 0,95, значения  $\pm 0,3$  мкм. В экспериментах использована разработанная в СФ ФИАН информационно-измерительная система. В этой системе реализован изобретенный там же способ координатных измерений (пат. 2109250 Россия), который характеризуется вычислением локальных наклонов поверхности с использованием тригонометрических формул по координатам зеркально отраженного сканирующего луча.

### Введение

В данной статье приведены первые результаты экспериментальных исследований способа координатных измерений (пат. 2109250 Россия) [1], изобретенного в Самарском филиале Физического института Российской академии наук (далее – СФ ФИАН). Для исследований была использована информационно-измерительная система (далее - ИИС), разработанная там же [2, 3]. В данной статье она названа как “двумерный лазерный триангулятор”. Пояснения к названию сделаны ниже, в разделе “Информационно-измерительная система”.

Исследуемый способ характеризуется вычислением локальных наклонов поверхности объекта измерений с использованием тригонометрических формул по измеренным координатам зеркально отраженного сканирующего луча.

Разработанная система ориентирована на решение практически важной и актуальной задачи, которая состоит в повышении эффективности контроля рабочих поверхностей деталей подшипников. Она способна выявлять дефекты формы, например, такие, как некруглость, огранка, а также гранность и волнистость. При больших скоростях и нагрузках, характерных, например, для работы двигателя, такие дефекты вызывают повы-

шенный нагрев, вибрации и шумность подшипников, что приводит к существенному снижению технико-экономических и эксплуатационных показателей техники.

Круг задач, решаемых разработанной ИИС, может быть расширен. Так, с ее помощью можно получать топограммы контролируемых поверхностей. На примере производства подшипников известно, что это нужно, как минимум, в двух задачах: при наладке шлифовального оборудования и при анализе качества рабочих поверхностей после моторесурсных испытаний. Возможны и другие применения исследуемого способа. Можно назвать, к примеру, контроль валов изделий точной механики.

### Сравнение с ближайшими аналогами

Если использовать зависимость угла отражения света от локального наклона контролируемой поверхности, то можно достичь значительно большей чувствительности прибора для измерений профиля поверхностей, по сравнению с обычными триангуляторами [4].

Указанный подход имеет много сходства с триангуляцией, поскольку одним из ключевых этапов вычислений при этом является решение треугольников. Однако ни один из известных автору способов, которых можно

относит к данному типу, не содержит алгоритмов координатных измерений рельефа контролируемой поверхности.

Для ряда таких способов характерно отсутствие вычислений, необходимых для этого, а названная зависимость используется только как индикатор дефектов формы поверхности контролируемого объекта. К их числу относится один из первых патентов по данной теме [5], относящийся к контролю поверхности качения колеса железнодорожного вагона. Еще один пример - заявка на способ контроля волнистости поверхности солнечных батарей [6]. В другой разработке [7] дефекты рельефа разных классов, таких как волнистость и шероховатость - их условно различают по разным диапазонам длин своей повторяемости - детектируют отдельно с помощью пространственной фильтрации отраженного пучка света. Амплитуду дефектов оценивают по ее корреляционной связи со вкладом соответствующей части отраженного пучка света в мощность всего этого пучка.

В большинстве способов, содержащих алгоритмы таких вычислений, координатные измерения ограничиваются определением величин средних параметров формы, таких, например, как радиус кривизны [8] - [10], или довольно приближенными оценками отклонений от заданной геометрической формы [11], [12].

### **Общая характеристика рассматриваемого способа**

В публикации [13] о работе, выполненной в СФ ФИАН, сообщалось о положительных результатах исследования применимости способа, подобного названным выше, для контроля дефектов формы, гранности и волнистости желоба внутреннего кольца шарикоподшипника. В частности, определялась высота гранности, волнистости. В расчетах были приняты допущения о виде трехмерной функции координат, которой описывались дефекты этих типов.

Впоследствии от этих ограничивающих допущений отказались, разработав тот самый способ и соответствующую ИИС, о которых, главным образом, написано в данной статье. Разработанная ИИС имеет следующие пре-

имущества перед существующими аналогами: она обладает расширенными функциональными возможностями - позволяет совместить измерение усредненного профиля тела вращения и микротопограммы гранности и волнистости, локализованной на криволинейной поверхности; благодаря адаптивной настройке с ее помощью можно контролировать более широкий спектр деталей с различными профилями поверхности; реализованный в ней способ измерений предъявляет существенно менее жесткие требования к точностным характеристикам сканера.

Для рассматриваемого способа имеются ограничения на форму контролируемых объектов. Первое - это ограничение максимального угла наклона поверхности к своей оси вращения. Контролировать удастся только боковые поверхности тел вращения. И второе - это ограничение на вариации кривизны в пределах контролируемой поверхности каждого отдельно взятого образца. Однако эти ограничения не являются принципиальными для метода измерений, использованного в данном способе. Как бы то ни было, они не мешают выполнять те функции, на которые ориентирована разработанная ИИС.

### **Алгоритмы координатных измерений**

Для пояснения работы ИИС приведем описание алгоритмов координатных измерений, ранее опубликованных в [2].

Контролируемая поверхность вращения восстанавливается в виде трехмерной функции следующего вида:

$$\rho(\varphi, z) = R(z) + H(\varphi, z), \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  - цилиндрические координаты;  $R(z)$  - средний профиль;  $H(\varphi, z)$  - случайная функция дефекта формы. На функцию (1) наложены ограничения:

$$R(z) \gg H(\varphi, z). \quad (2)$$

Измерению подлежат средний профиль  $R(z)$  и рельеф поверхности  $H(\varphi, z)$ .

На рис. 1 в системе декартовых координат изображены источник света 1, контролируемая поверхность 2 и фотоприемник 3. Параллельно оси  $OZ$  со сдвигом  $d$  проведена прямая  $AB$ . Сканирование поверхности 2 производится точечным источником света в направлении  $AB$ . Падающий луч  $\vec{a}$  перпендикулярен плоскости  $YOZ$ . Отраженный луч  $\vec{b}$  регистрируется матричным фотоприемником, размещенным в схеме так, чтобы столбцы матрицы были параллельны оси  $OZ$ , а строки параллельны плоскости  $XOY$ . Для регистрации луча  $\vec{b}$  фотоприемник 3 имеет возможность перемещаться по дуге окружности радиуса  $L$ , с центром в точке  $O$ , в диапазоне углов  $[\psi_1, \psi_2]$ .

Для каждого локального освещенного участка поверхности определяются величина угла  $\psi$ , отсчитываемая от положительного направления оси  $OX$  и координата  $\xi$ , отсчитываемая по оси  $OZ$ , соответствующие энергетическому центру отраженного пучка света. Сканирование контролируемой поверхности реализуется путем дискретных перемещений источника света вдоль оси  $OZ$  и дискретным поворотом объекта 2 на угол  $\varphi$  вокруг оси  $OZ$  в диапазоне  $0 < \varphi < 2\pi$ .

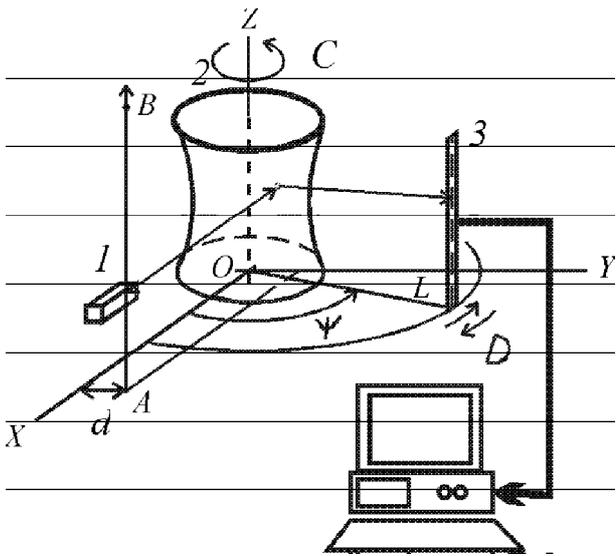


Рис. 1. Оптико-механическая схема координатных измерений:

1 – осветитель; 2 – контролируемый объект; 3 – фотоприемник; направления сканирования поверхностей –  $AB$ ,  $C$ ; направление поиска и сканирования отраженного луча –  $D$

Данные измерений накапливаются в компьютере:

$$\psi(\varphi, z) = \psi_0(z) + \varepsilon(\varphi, z), \quad (3)$$

$$\theta(\varphi, z) = \theta_0(z) + \gamma(\varphi, z), \quad (4)$$

где  $\theta = \arctg((\xi - z)/L)$ . Азимутальный  $\psi$  и меридиональный  $\theta$  углы содержат измерительную информацию о поверхности 2. Углы  $\psi_0(z)$  и  $\theta_0(z)$  являются средними величинами измеренных углов за полный оборот поверхности 2 по профилю ее нормального сечения  $z$ . В данном случае этим сечением является круговое сечение поверхности вращения. Указанные углы зависят от величин среднего профиля  $R(z)$ . Величины отклонений  $\varepsilon(\varphi, z)$  и  $\gamma(\varphi, z)$  зависят от формы функции  $H(\varphi, z)$ .

Из законов геометрической оптики выводятся уравнения:

$$\frac{\partial H}{\partial \varphi} = F(\rho, \psi, \theta), \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = G(\rho, \psi, \theta) - R_z(z), \quad (6)$$

из которых затем определяются градуировочные характеристики ИИС.

Восстановление поверхности производится в два этапа.

На первом этапе для каждого кругового сечения  $z = z_k$  из условий

$$\frac{\partial H}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

и уравнений (5), (6) определяются величины среднего радиуса  $R(z)$  и среднего наклона  $R_z(z_k)$ . Для их нахождения получают следующие уравнения:

$$F(R(z_k), \psi_0(z_k), \theta(z_k)) = 0, \quad (8)$$

$$R_z(z_k) = G(R(z_k), \psi_0(z_k), \theta_0(z_k)).$$

На втором этапе из уравнений (5), (6) с помощью интегрирования восстанавливается функция  $H(\varphi, z)$ .

### Информационно-измерительная система

Эксперименты были проведены с помощью ИИС, специально разработанной для этой цели в СФ ФИАН. Поясним ее название.

При измерениях обычным триангулятором оптическое изображение освещенной точки контролируемой поверхности на фотоприемнике никогда не выходит из плоскости, в которой лежат главные оптические оси осветителя и объектива, формирующего это изображение. В исследуемой же схеме, наоборот, положение плоскости, которая проходит через падающий и отраженный лучи света, зависит от локальной нормали к контролируемой поверхности. Это требует измерений положения отраженного луча в двух координатах.

ИИС (рис. 2) состояла из следующих компонентов: оптико-механический блок, контроллеры устройств, которые через соответствующие адаптеры связаны с персональным компьютером типа IBM PC, ТВ монитор.

Оптико-механический блок объединял в себе осветитель, фотоприемник, служебные механизмы и датчики, обеспечивавшие их перемещения и разворот контролируемой детали, пульт дистанционного управления.

ИИС обеспечивала сканирование конт-

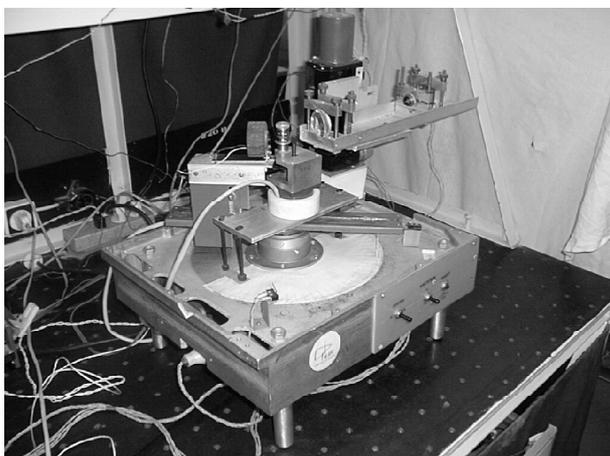


Рис. 2. Внешний вид оптико-механического блока

ролируемой поверхности сфокусированным пучком света с углом полной расходимостью  $1,7^\circ$ . Используемый лазерный диод ИЛПН-210-2А (ПО "Север", г. Новосибирск) имел длину волны  $0,8 \text{ мкм}$ . Мощность излучения составляла доли микроватт. Высокое качество одномодового пучка света позволяло получить пятно на поверхности с размерами  $0,05 - 0,08 \text{ мм}$ .

Прикладное программное обеспечение реализовано в операционной системе MS-DOS с помощью интегрированной программной среды "Турбо-Си" 2.0 фирмы Borland Int., связь с периферийным оборудованием осуществлялась через интерфейс ISA.

Разработанная ИИС имела следующие основные параметры:

- время сканирования одной точки поверхности объекта –  $0,5 \text{ с}$ ;
- время одного шага двигателей –  $0,05 \text{ с}$ ;
- дискретность цифрового представления интенсивности света – 64 градации;
- дискретность оцифрованного изображения пучка света на фотоприемнике –  $256 \text{ на } 256$ , что соответствовало апертуре ПЗС-матрицы  $3,3 \text{ на } 3,3 \text{ мм}$ ;
- дискретность разворота объекта – максимум 600 шагов на полный оборот;
- шаг каретки с фотоприемником –  $0,078^\circ$ ;
- дискретность отсчетов угла поворота каретки с фотоприемником –  $0,038^\circ$ ;
- минимальный шаг осветителя –  $2,5 \text{ мкм}$ .

### Эксперимент

Были проведены координатные измерения детали сложной формы, специально изготовленной для данного эксперимента. Ее боковая поверхность представляла собой чередование цилиндрических и плоских участков. Она была получена стачиванием цилиндрической поверхности до шестигранника, но не до конца, а с оставлением цилиндрических участков между гранями. Поверхность имела шероховатость  $Ra 0,32 \text{ мкм}$ . Результаты измерений сравнивались с измере-

ниями, проведенными штангенциркулем. Сравнение показало, что восстановленная форма поверхности практически конгруэнтна, с погрешностью до  $\pm 0,5$  мм, форме измеряемой поверхности объекта. Это согласуется с результатами расчетов, выполненных путем численного моделирования. Несмотря на то, что использованный алгоритм основан на приближенном уравнении, справедливом только при соблюдении условий (2), которые в данном случае не выполнялись, погрешности измерений параметров формы - это диаметр описанной окружности и расстояние между противоположными гранями - оказались не слишком большими. Полученные величины сравнимы с показателями обычных триангуляторов, восстанавливающих поверхность объектов, имеющих сложную форму и сильно выраженный "скульптурный" рельеф.

В экспериментах по контролю микрорельефа поверхности также восстанавливались профили круговых сечений желоба внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201 (рис. 3). По восстановленным профилям определялся один из статистических параметров контроля микрорельефа - гранность. Этот параметр определялся в соответствии с [14] - [16]. Гранность определялась практически так же, как обычно определяют стандартный параметр  $Rz$  для шероховатости. Для экспериментов были взяты два образца однотипной детали. Один из них имел дефект микрорельефа "гранность". Ее величина, по сертифицированным измерениям, сделанным с помощью контактного профилометра, со-

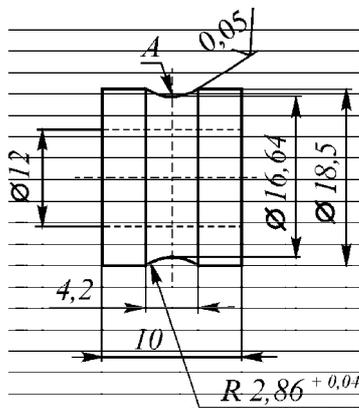


Рис. 3. Объект с тестируемой поверхностью:  
А - желоб

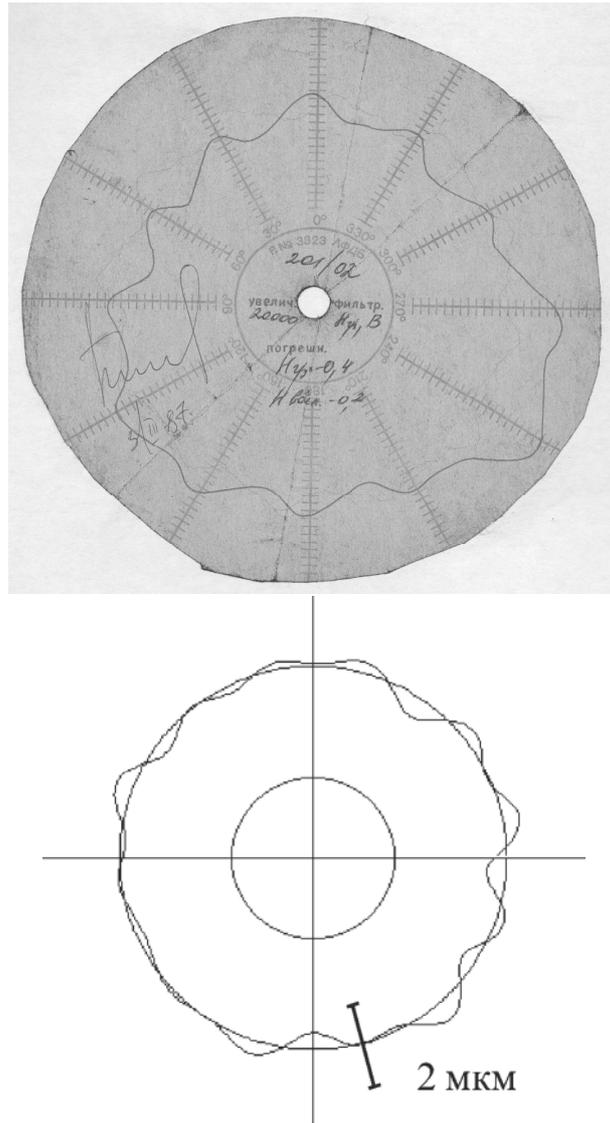


Рис. 4. Круглограммы контролируемой поверхности, полученные с помощью разных приборов:  
а - контактный профилометр;  
б - двумерный лазерный триангулятор

ставляла 0,4 - 0,5 мкм (рис. 4 (а)). Измерения были проведены прибором Talyrond 51 (Rank Taylor Hobson Ltd, Великобритания) специалистами ОАО "Самарский подшипниковый завод - 4". Гранность имела характерный период 12 волн на оборот поверхности. Другой образец не имел этого дефекта. Величина гранности, измеренная тем же способом, составляла у него 0,06 мкм. При этом измерения проводились почти на пределе чувствительности прибора.

Координатные измерения были проведены автором, как и измерения, сделанные контактным профилометром, на тех же образцах деталей, примерно в тех же круговых сечениях, находившихся в районе дна желоба.

Более точно совместить профили не представлялось возможным, поскольку в использованных ИИС не был предусмотрен отсчет координат измерительного щупа от поверхности базирования контролируемого объекта вдоль оси  $z$ . Была сделана серия измерений. Они были проведены вдоль одного кругового профиля, проходящего через дно желоба. Параметры настройки были следующими:  $d=7\text{ мм}$ ,  $L=35\text{ мм}$ . При этом угол падения пучка света на контролируемую поверхность был, в среднем,  $58^\circ$ ,  $\psi_0=102^\circ$ . Вдоль одного кругового профиля объекта приходилось 60 отсчетов измеренных координат отраженного луча.

При расчете координат энергетического центра пучка света на ПЗС-матрице проводилась пороговая фильтрация оцифрованного массива распределения интенсивности по уровню 0,5 от максимальной величины, отсчитываемой от уровня фона. Эта максимальная величина, но отсчитываемая уже от нуля, определялась на каждом шаге сканирования. Ее значение сравнивалось со значением порогового уровня, заданным в программе. По

нему, в свою очередь, проводилась фильтрация отсчетов координат энергетического центра отраженного пучка на фотоприемнике. В данной серии опытов это число устанавливалось равным 30.

Круглограмма типичного профиля из этой серии опытов приведена на рис. 4 (б). Кроме самого восстановленного профиля, с помощью исследуемого устройства также были получены графики зависимостей  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$  (рис. 5 (б)). На рис. 5 (а) приведена фотография отраженного пучка на фотоприемнике, сделанная этим же фотоприемником непосредственно перед началом данной серии опытов. Она изображена в том же масштабе, что и вертикальная ось на графике, показанном на рис. 5 (б).

Для указанных зависимостей и для восстановленного профиля также были получены спектры пространственных гармоник (рис. 6). На рис. 7 (а) приведены измеренные значения высоты гранности в одной из серий опытов, в зависимости от порядкового номера в последовательности проведенных друг за другом измерений. Этот график нужен для того, чтобы оценить качество статистических

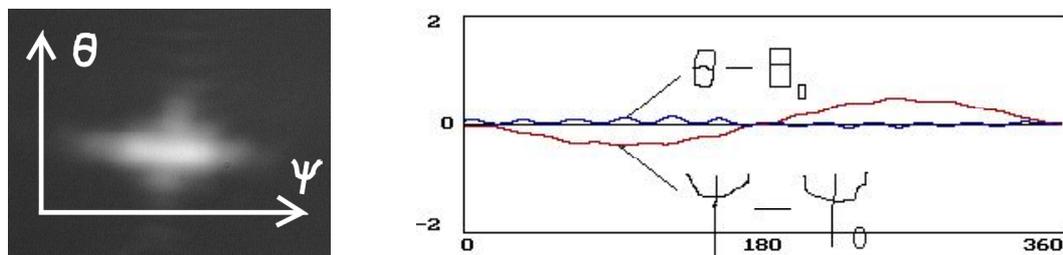


Рис. 5. Зависимости  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$ , полученные с дефектного образца: размерность по осям абсцисс и ординат – градусы

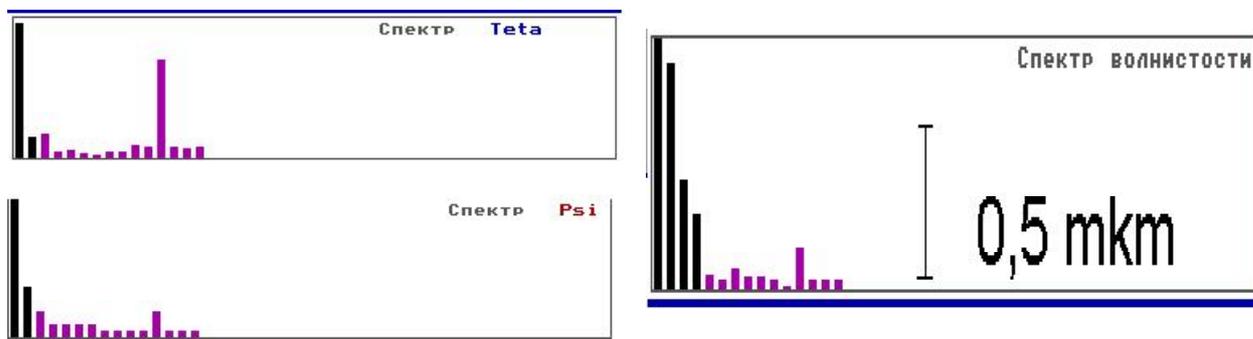


Рис. 6. Разложение зависимостей  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$ , а также восстановленного профиля поверхности в спектр количества волн по этому профилю: номер гармоники отсчитывается слева направо, начиная с 1; амплитуды волн на рис. (а) и (б) изображены в одинаковом масштабе относительных величин

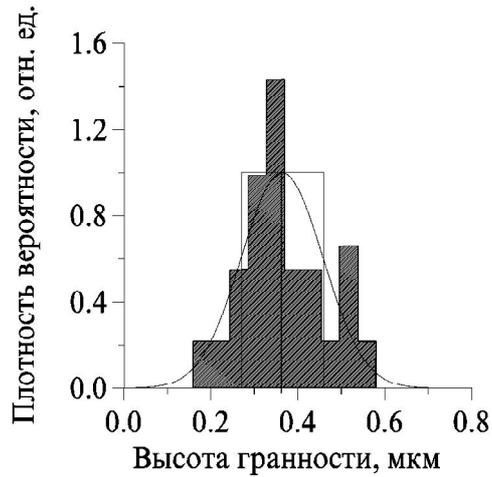
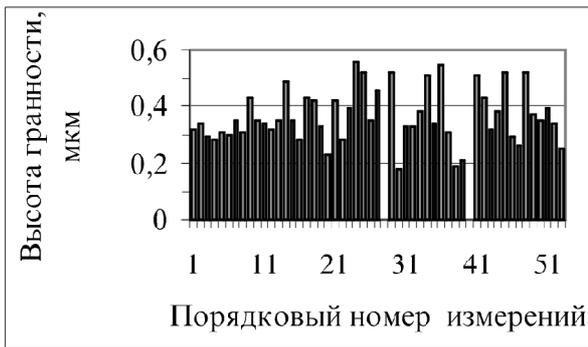


Рис. 7. Значения высоты гранности, измеренные в одной серии опытов, и их гистограмма

данных. На рис. 7 (б) изображена соответствующая им гистограмма.

Результаты экспериментов показали следующее.

Гранность профиля отчетливо наблюдалась во всех опытах из рассматриваемой серии при измерениях дефектного кольца шарикоподшипника. Во всех опытах (из серии измерений рассматриваемого образца с дефектом) спектр пространственных гармоник профиля отчетливо показывал преобладание 12-й гармоники.

Судя по графикам  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$  и спектрам пространственных гармоник, волны гранности, имеющейся на желобе данного дефектного объекта, направлены практически поперек этого желоба. По своей структуре гранность данного конкретного образца похожа на шероховатость поверхностей вращения, обработанных на токарных и шлифовальных станках. Линии горбов и впадин лишь незначительно отклонялись от направления вдоль желоба. Можно предположить, что такая структура гранности и волнистости типична для поверхностей вращения. Это не самая благоприятная структура микрорельефа для исследуемого устройства, особенно при координатных измерениях при величинах угла  $\theta$  близких к нулю, соответствующих дну желоба кольца шарикоподшипника. Указанный факт ограничивал точность определения параметров микрорельефа. Автор полагает, что более полное использование составляющей информационного сигнала,

связанной с углом  $\theta$ , в алгоритмах восстановления поверхностей могло бы значительно повысить чувствительность и точность разработанной ИИС.

Результаты согласуются с измерениями, проведенными контактными профилометром. Измеренная высота гранности составила 0,4 мкм. Погрешность измерений, по уровню значимости 0,05 по критерию Пирсона, составила  $\pm 0,3$  мкм. Это хуже, чем у контактного профилометра, но все же удовлетворяло требованиям, предъявляемым к измерениям ГОСТом [15] (для части качеств допуска размеров), а также в подшипниковой промышленности. Так, по критерию обнаружения дефектов микрорельефа по максимальному наклону профиля 1/400 по отношению к линии базового профиля, относительная погрешность измерений в рассматриваемой серии опытов составила около 10%, что отвечало техническим требованиям, предъявляемым к приборам для измерений формы и расположения поверхностей вращения [16], [17].

Эксперименты с бездефектным кольцом дали для высоты гранности значение 0,2 мкм (при 0,06 мкм по измерениям контактными профилометром). При этом профили, снятые в ряде опытов, были похожи друг на друга в своих деталях. Хотя в значительном количестве этих опытов наблюдались отклонения, сравнимые с измеренной величиной.

Гистограмма данных, полученных с дефектного кольца, не соответствовала гауссо-

вому распределению. На рис. 6 (а) видна нестабильность результатов измерений. По наблюдениям оптического сигнала на мониторе в процессе измерений выяснилось, что значительные отклонения имели место в случаях попадания зондирующего пучка на участки контролируемой поверхности с локальными дефектами. В серии опытов при максимальной частоте дискретности отсчетов кругового профиля стабильность результатов еще более ухудшалась. Это можно объяснить увеличением вероятности попадания локальных дефектов в область, освещаемую зондирующим пучком в процессе измерений.

Заметим, что первые 10 опытов из рассматриваемой серии дали гораздо более стабильные результаты. Если судить по данной выборке результатов, то погрешности измерений могут быть уменьшены почти на порядок. Этого можно достичь, на взгляд автора, с помощью более совершенных алгоритмов фильтрации сигналов.

### Заключение

Точность измерений в рассматриваемой задаче соответствовала техническим требованиям.

Факторы, связанные с геометрией и кинематикой оптико-механического блока работанной ИИС, не оказывали заметного влияния на погрешность координатных измерений.

Точность измерений ограничена одним преобладающим фактором. Он связан с влиянием локальных микродефектов на оптический сигнал. Для борьбы с вредным влиянием этого фактора нужны более эффективные алгоритмы фильтрации данных.

Чувствительность устройства во многом определяется близостью направления, по которому восстанавливается профиль контролируемой поверхности, и преобладающего направления ее микрорельефа.

Автор благодарит бывшего сотрудника СФ ФИАН В. Н. Белопухова за разработку ИИС и большую помощь в работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2109250 Россия, МПК <sup>6</sup>G 01 В 11/24. Способ измерения геометрической формы тел вращения с отражающей поверхностью / Белопухов В. Н., Бесталанный - С. И., Заякин О. А.; Самарский филиал ФИАН. - №95100536/28 (001062); Заявл. 12.01.95; Оpubл. 20.04.98, Бюл. №11.
2. *Belopukhov V. N., Naumov A. F., Podvigin V. N., Zayakin O. A.*, Form measurement sensor for rotation reflecting surfaces // 5-th International Conference on Industrial Laser and Laser Applications'95: 24 - 27 June 1995, Shatura, Moscow Region, Russia (Proc. SPIE, Vol. 2713) / V. Ya. Panchenko, V. S. Golubev, Editors. 1996.
3. *Заякин О. А.* Оптико-электронная система для контроля рабочих поверхностей изделий машиностроения: экспериментальная оценка точности измерения параметров геометрической формы // Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д. Кузнецова. Ч.1. Самара: СНЦ РАН, 2001.
4. *Плотников С. В., Подчернин В. М., Быковская И. В.* Исследование и разработка триангуляционных измерителей и их промышленных применений // Наука - производству. 2003. № 2.
5. Пат. 2178169 Брит., МКИ <sup>4</sup>G 01 В 11/24 11/30. A method and apparatus for the contactless examination of surfaces / Breuckmann B., Thieme W. (ФРГ); MAN Technologie GmbH. -№ 8614897; -Заявл. 19.06.86; Оpubл. 4.02.87; Приор. 27.06.85; НКИ G1M 6D, U1S 1831 1844 G1M.
6. Заявка 4207592 ФРГ, МКИ <sup>5</sup>G 01 В 11/30. Verfahren zum Bestimmen der Welligkeit einer Oberfläche / Berg R.; Siemens Solar GmbH. -N 42075920; Заявл. 10.3.92; Оpubл. 16.9.93.
7. Пат. 2116616 Россия, МПК <sup>6</sup>G 01 В 11/00. Устройство для измерения шероховатости и волнистости поверхности при фиксированном значении базовой длины /

- Белов В. К. - № 96116393/29; Заявл. 12.08.96; Оpubл. 27.07.98, Бюл. № 21.
8. Пат. 5233201 США, МКИ <sup>5</sup>G 01 V 9/01. System for measuring radii of curvatures / Cheng David; Ann First American Building. - № 922910; Заявл. 21.01.92; Оpubл. 03.08.93; НКИ 250/561.
9. Пат. 2054619 Россия, МКИ <sup>6</sup>G 01 B 11/24. Способ определения кривизны зеркально отражающих поверхностей / Гуляев В. И., Залкинд А. Е., Морозов Н. Л.; НПО Электрон. - № 4707230/28; Заявл. 19.6.89; Оpubл. 20.2.96, Бюл. № 5.
10. А. С. 1320658 СССР, МКИ <sup>4</sup>G 01 B 11/02. Способ измерения линейных размеров объектов с отражающей поверхностью / Иванов В. С., Спиренков Н. П., Колтунов С. Ю. (СССР). -№ 4024911/24-28; Заявл. 21.02.86; Оpubл. 30.06.87; Бюл. № 24.
11. *Mike Hidetoshi, Koga Kazutoshi, Yamada Takihito, e.a.* Measuring surface shape from specular reflection image sequence: Quantitative evaluation of surface defects of plastic moldings / Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. 1995., No. 12 A, Vol. 34. L 1625 - L 1628.
12. Пат. 5414517 США, МКИ <sup>6</sup>G 01 B 11/24. Method and apparatus for measuring the shape of glossy objects / Furuhashi Noboru; Agency of Industrial Science and Technology; Ministry of International Trade and Ind. -№ 36251; Заявл. 24.3.93; Оpubл. 9.5.95; Приор. 1.5.92, № 4 - 139704 (Япония); НКИ 356/376.
13. *Belopukhov V. N., Volostnikov V. G., Podvigin V. N., Zayakin O. A.*, Technological system for control of bearing ring runway surface // 5-th International Conference on Industrial Laser and Laser Applications'95: 24 - 27 June 1995, Shatura, Moscow Region, Russia (Proc. SPIE, Vol. 2713) / V. Ya. Panchenko, V. S. Golubev, Editors. 1996.
14. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей: Основные термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1990.
15. ГОСТ 24643-81. Допуски формы и расположения поверхностей: Числовые значения. М.: Изд.-во стандартов, 1981.
16. *Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н.* Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978.
17. ГОСТ 17353-89. Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения. Типы. Общие технические требования. М.: Изд. стандартов, 1989.

**SPECULARLY REFLECTIVE SURFACES RETRIEVAL  
BY AN INFORMATIONS AND MEASUREMENTS SYSTEM  
ON A 2-DIMENSIONAL LASER TRIANGULATION PRINCIPLE**

© 2004 O. A. Zayakin

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

Experimental results on a retrieval of some profiles of specularly reflected surfaces are presented including a measurements for a tray on an inner ring of bearing having a diameter of 18.5 mm. The tray had a radius of curvature of  $2.86^{+0.04}$  mm, and scratches of  $Ra$  0,05 mm, and a typical defect of an unroundness having a wave number of 12 per a full revolution and a value similar to  $Rz$  0,4 mic. Uncertainties of this value did not exceed with a probability of 0.05 of  $\pm 0,3$  mic in the experiment. An informations and measurements system was used in the experiment. It has been developed in P. N. Lebedev Physical Institute of RAS, Samara branch. A method of an angle and linear measurements (Pat. 2109250 Russia) has been realised in this system, that is characterised with calculations for a surface local slopes with a trigonometrical formulas on a specularly reflected beam coordinates.