

## Методы повышения точности линейных измерений на измерительных микроскопах с помощью цифровой обработки оптических изображений

### Methods of improving the accuracy of linear measurements for measuring microscope with the help of digital optical image processing

*В статье описаны способы повышения разрешения изображений поля зрения измерительного микроскопа за счет использования координатно-измерительной системы. Для этого используется программная обработка множества изображений сдвинутых относительно друг друга на расстояние, меньшее разрешения видеосистемы.*

*This article describes how to improve the resolution in the image field of view in measuring microscope by using coordinate-measuring system. To do so software processing is being used for multiple images shifted to one another at a distance less than resolution of video system.*

**Ключевые слова:** повышение точности, линейные измерения, оптические изображения.

**Keywords:** accuracy increase, linear measurements, optical images.

На кафедре ИИСиТ при МГТУ "СТАНКИН" сейчас ведутся исследования по использованию законов дифракции света для повышения точности измерений в микроскопии. Для изучения процессов дифракции на краях различных измеряемых объектов используется автоматизированная система на базе микроскопа УИМ-21, дополненного двумя фотоэлектрическими линейками, цифровой видеокамерой и персональным компьютером [1]. Наличие персонального компьютера позволяет производить различные программно-математические обработки изображений поля зрения микроскопа [2]. При этом, затраты времени на реализацию каждого конкретного алгоритма являются минимальными, что ускоряет процесс научных исследований.

В микроскопии существенное влияние на результаты измерений влияет дифракция. В некоторых случаях для устранения данного влияния возможно применение измерительных ножей, но их применение сильно замедляет измерительный процесс. Возможен другой способ устранения данного влияния – использовать законы дифракции, как дополнительную меру при проведении измерений. Результаты фотосъемки картины дифракции на краю и поперечное сечение изображения показаны на рисунке №1.

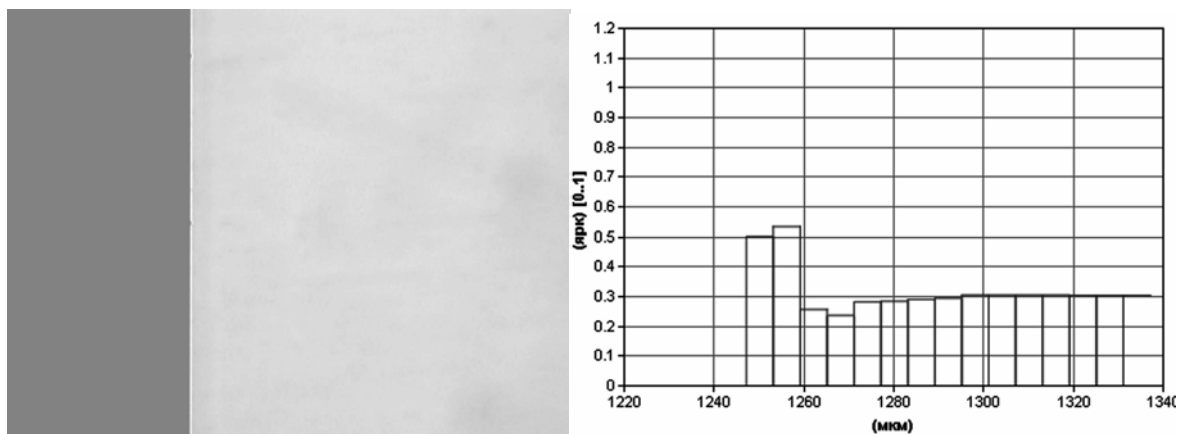


Рис. 1. Слева – изображение края концевой меры длины в поле зрения микроскопа для однократного объектива. Справа – яркости пикселей поперечного сечения области вокруг границы света и тени при шаге пикселей приблизительно равном 6 мкм.

Разрешение данной видеосистемы при использовании 5-кратного объектива составляет приблизительно 1,5 мкм на пиксель, что недостаточно для исследования процессов дифракции. Это послужило причиной поиска способа повышения разрешения получаемых изображений без необходимости приобретения дорогих устройств. В результате был найден способ получения изображений с более высоким разрешением за счет использования фотоэлектрических линеек имеющих точность в 0,1 мкм. Этот способ, из-за потерь высоких частот при получении изображений, не подходит для повышения точности измерений. Но позволяет визуально оценить картину дифракции с более высоким разрешением.

Исходное высокочастотное изображение поля зрения микроскопа фотографируется цифровой видеокамерой. Физическое устройство матрицы камеры производит суммирование света, попадающего на поверхность фотоячеек. Что будет, если произвести небольшой сдвиг поля зрения микроскопа относительно картины дифракции? Пиксели будут суммировать интенсивность других координат исходного изображения, что изменит количество приходящего на них света. Это удобно проиллюстрировать на примере одномерной функции дифракции на идеальной полуплоскости, показанной на рисунке №2.

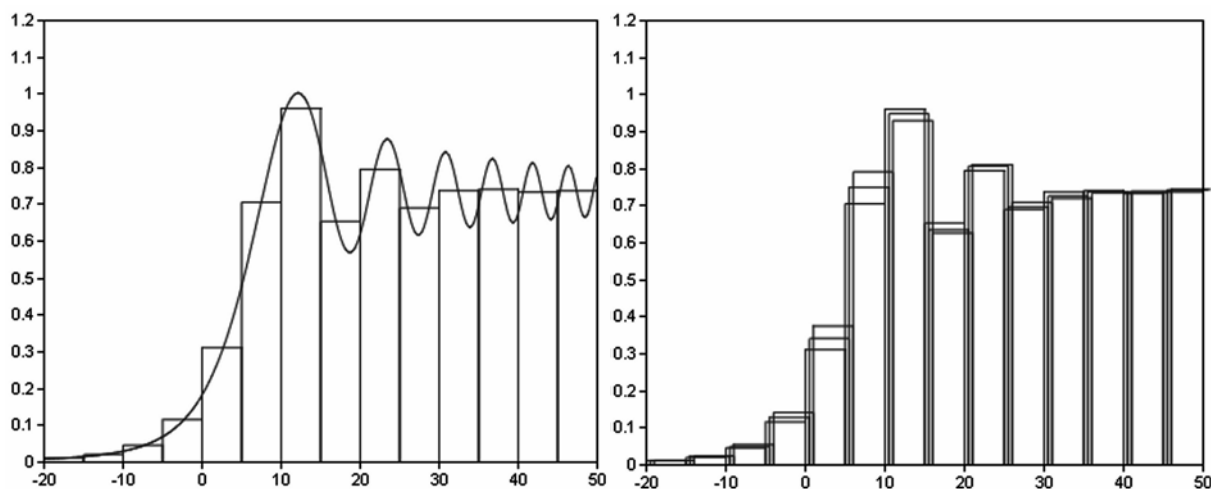


Рис. 2. Слева – теоретическая функция дифракции и освещенности пикселей, получаемые интегрированием функции. Справа – пиксели трех последовательных изображения из десяти сдвинутых на 0,1 ширины пикселя.

Хорошо видно, что сдвиг пикселей относительно изображения приводит к изменению их освещенности. Исходя из этого, можно предположить, что, произведя какую-либо математическую обработку пикселей можно частично восстановить форму теоретической функции. Исходными данными для этого являются освещенности  $I_{i,j}$  и координаты пикселей  $X_{i,j}$ , где  $i$  - номер изображения, а  $j$  - номер пикселя на изображении. В таком случае координаты связаны с номерами через величину сдвига между изображениями  $P_s$  и ширину пикселя  $P_w$ , которая должна быть кратна

сдвигу:  $P_w \bmod P_s = 0$ . В таком случае нужно всего  $n = \frac{P_w}{P_s}$  изображений.

$$X_{i,j} = i \cdot P_s + j \cdot P_w \quad (1)$$

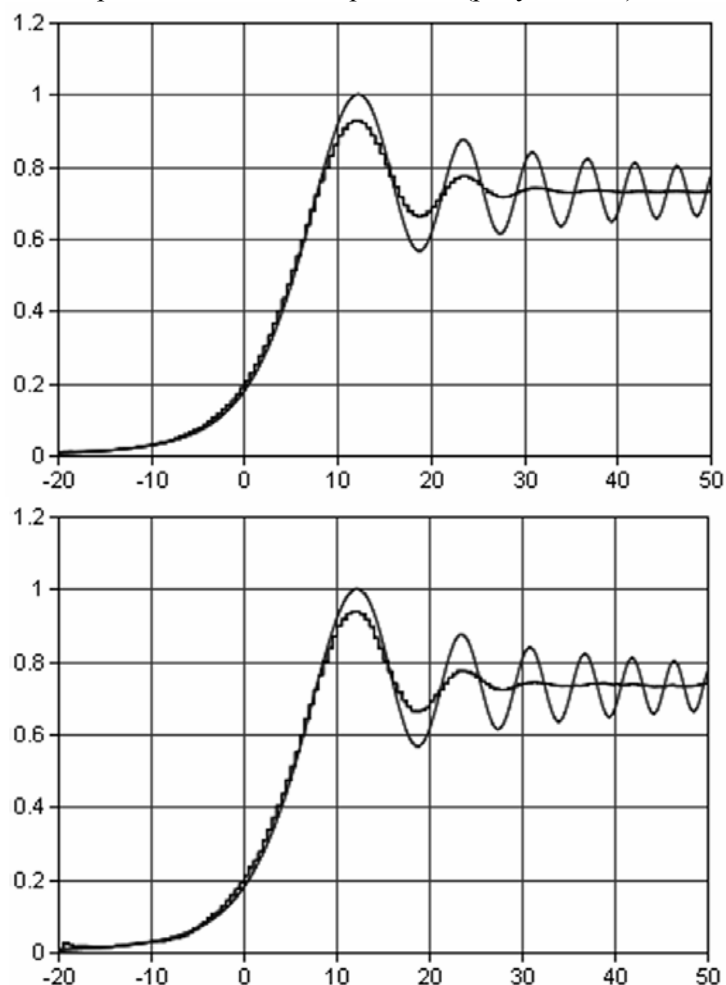
$$I_{i,j} = \int_{X_{i,j}}^{X_{i,j}+P_w} f(x) dx \quad (2)$$

Для простоты можно воспользоваться простым усреднением всех пикселей  $I_{i,j}$  пересекающих восстанавливаемую точку функции  $x$ :

$$I(x) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} I_{i,j}}{n} \quad (3)$$

$$\text{где } i \cdot P_s + j \cdot P_w \leq x < i \cdot P_s + j \cdot P_w + P_w, \text{ что сводится к } j = \left\lfloor \frac{x - i \cdot P_s}{P_w} \right\rfloor$$

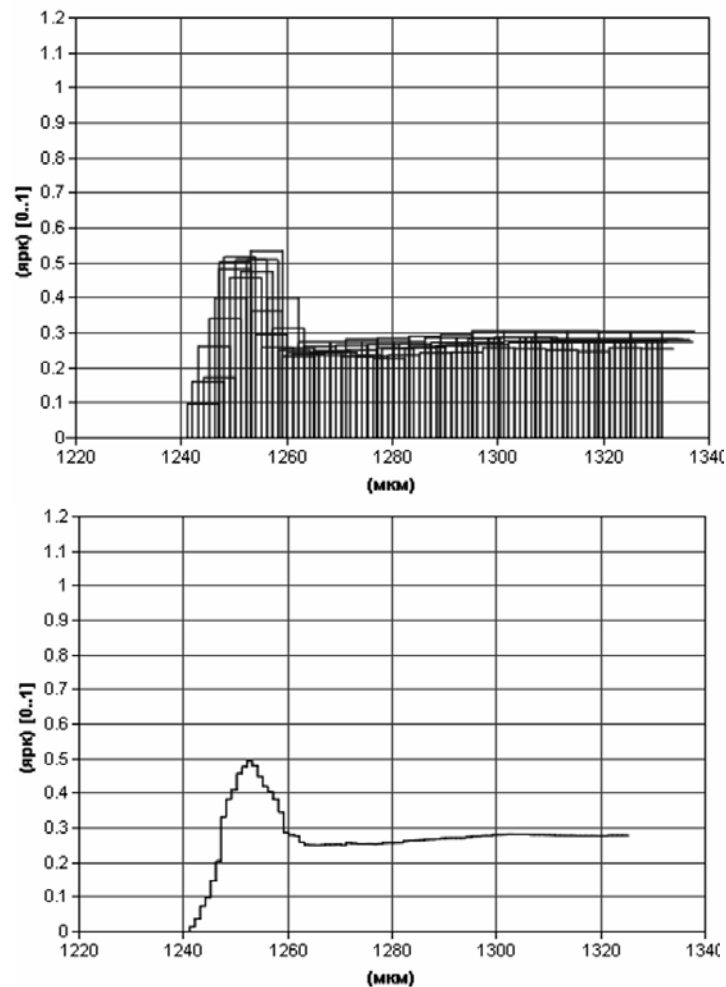
В результате данных вычислений получается множество субпикселей имеющих ширину  $P_\Delta$ , которая меньше исходной ширины пикселей изображения (рисунок №3).



**Рис. 3. Гладкая теоретическая функция и ступенчатая функция, восстановленная по множеству изображений. Слева – без добавления шума. Справа – с добавлением к освещенности пикселей равномерного шума величиной  $\pm 0.05$ .**

Как видно из вычислительного эксперимента восстановленная функция имеет другую амплитуду, это связано с тем, что получение исходных пикселей изображений производится с помощью интегрирования, при котором происходит потеря высоких частот, и уже невозможно восстановить истинную амплитуду функции. С другой стороны положение всех локальных минимумов и максимумов исходной и восстановленной функций совпадает. Наличие небольшого шума в исходных пикселях почти не искажает восстановленную функцию. Это дает возможность сравнивать теоретические функции дифракции для разных типов краев объектов с реально измеренными краями.

Производить перемещения поля зрения на микроскопе на единицы и доли микрометра вручную очень сложно. Но можно произвести множество случайных перемещений. И из них отобрать те, которые будут максимально приближены к нужной последовательности сдвигов изображений. Для проведения реального эксперимента было выбрано исследование рабочего края концевой меры длины при использовании однократного объектива. Для него шаг пикселей составил  $P_w = 6$  мкм, а величина сдвига, т.е. размер субпикселя, подбирался приближенно равным  $P_s \approx 1$  мкм. Из множества случайно сдвинутых изображений были выбраны  $n = 6$  наиболее близких к координатам кратным  $P_s$ . Поперечное сечение выбранных изображений и результаты восстановления представлены на рисунке №4.



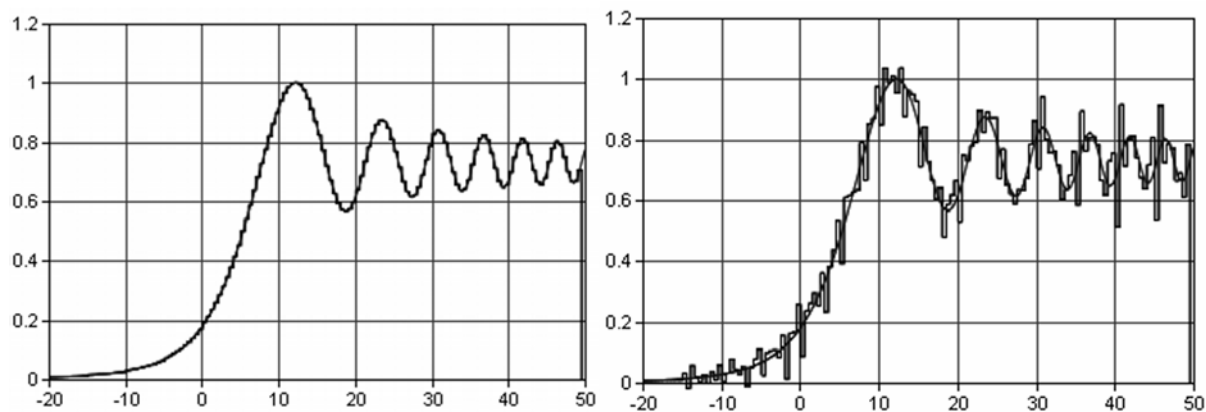
**Рис. 4.** Слева - пиксели сечения выбранных изображений. Справа - восстановленная картина дифракции с разрешением 1 мкм.

В результате восстановления получилась приближенная картина дифракции для исследуемого края. На данном микроскопе система видеозахвата создает шум порядка  $\pm 5\%$  диапазона яркости пикселей. Из-за этого данная картина может быть искажена, но максимум первого порядка дифракции хорошо заметен.

Кроме метода усреднения существует более точный метод восстановления – решение системы уравнений зависимостей освещенностей пикселей  $I_{i,j}$  от предполагаемой освещенности субпикселей  $f_k$ , где  $k = i + j \cdot n$  – номер субпикселя. В таком случае получается система простых уравнений:

$$I_{i,j} = \sum_{k=i+j \cdot n}^{i+j \cdot n + n - 1} f_k \quad (4)$$

В данной системе есть  $n \cdot m$  уравнений и  $n \cdot m + n - 1$  неизвестных, где  $m$  – количество интересующих пикселей в сечении изображения. Количество неизвестных превышает количество уравнений, поэтому, для решения системы, необходимы дополнительные сведения. Для добавления  $n - 1$  уравнений в систему можно сделать предположение, что освещенности субпикселей первого пикселя равны:  $f_0 = f_1 = \dots = f_{n-1}$ . В результате количество уравнений увеличивается. Наиболее часто при восстановлении картины дифракции по фотографиям освещенность первого пикселя интересующего сечения равна нулю. Например, на рисунке №4 в области сечения изображения с координатами от 1220 до 1240 мкм все пиксели имеют нулевую освещенность. А при введении неявного условия, что освещенность не может быть отрицательной величиной:  $I_{i,j} \geq 0$  и  $f_k \geq 0$  получаются, что  $f_0 = f_1 = \dots = f_{n-1} = 0$ . Это позволяет ввести правильные физические дополнения в систему уравнений.



**Рис. 5. Гладкая теоретическая функция и ступенчатая функция, восстановленная методом системы уравнений. Слева – идеальный случай без шума. Справа – с добавлением к освещенности пикселей равномерного шума величиной  $\pm 0.003$ .**

На рисунке №5 показан результат восстановления методом системы уравнений. Этот метод позволяет получать форму функции более близкую к исходной. Но результат очень сильно зависит от величины шума, так как в данном методе происходит усиление шума пропорциональное величине увеличения разрешения.

Оба метода позволяют получать картину дифракции с более высоким разрешением, чем имеет система видеозахвата. Но у каждого из них есть свои недостатки. Картина, получаемая методом уравнений, слишком сильно искажается шумами на изображениях, а картина, получаемая методом усреднения, в своем принципе имеет некоторое шумоподавление. Метод усреднения вносит некоторые искажения в результирующую картину из-за процесса усреднения, а метод уравнений, ввиду своей математической строгости, вычисляет наиболее точную картину. Для обоих методов существенную погрешность вносят оптические aberrации. Но, зная функцию этих искажений и используя монохроматическую подсветку, в получаемые изображения можно внести обратные искажения. В результате будут получаться пространственно-точные изображения.

#### Библиографический список

- |   |  |
|---|--|
| 1. <b>В.И. Телешевский, А.В. Шулепов, О.Ю. Красюк</b> // Измерительная техника. – 2006. – №8. | 2. <b>В.Г. Пантелеев, О.В. Егорова, Е.И. Клыкова</b> Компьютерная микроскопия. – М.: Техносфера, 2005. |
|---|--|

#### References

- |  |  |
|--|--|
| 1. <b>V I Teleshevsky, A V Shulepov, O J Krasuk</b> // Measuring Techincs. – 2006. – №8. | 2. <b>V G Panteleev, O V Yegorova, E I Klykova</b> Computer microscopy. – M.: Technosphere, 2005 |
|--|--|

*Шулепов Алексей Виленинович - доцент кафедры ИИС и Т МГТУ «Станкин», кандидат технических наук,  
Тел.: (499) 972-94-65, (499) 972-94-64*

*Есин Алексей Петрович - аспирант кафедры ИИС и Т МГТУ «Станкин»  
Тел.: (926)223-22-14  
e-mail: esalexey@yandex.ru*

*Shulepov Alexey Vileninovich – lecturer of chair IISiT MSTU «Stankin» Cand.Tech.Sci  
Yessin Alexey Petrovich - Postgraduate student of IISiT MSTU «Stankin»*

## Использование ПК «Эксперт» для расчета наладок зубошлифовального станка мод. 5А872В

### Use of PC “Expert” for design the settings up for tooth grinding machine 5A872B

*Рассмотрен опыт использования программного комплекса ЭКСПЕРТ для технологического синтеза конических передач с круговыми зубьями в условиях единичного производства. Предложены и реализованы в виде программного блока алгоритмы расчёта наладок станка мод. 5А872В и настройки аппарата правки шлифовального круга.*

*The experience of adaptation PC EXPERT for technological synthesis of the spiral bevel gears in individual manufacturing is considered. The algorithms for calculation the settings up for machine 5A872B and the tuning settings for adjustment device of a grinding wheel are propose and realize in the program module.*

**Ключевые слова:** конические передачи с круговыми зубьями, наладки станков, зубошлифовальный станок мод. 5А872.

**Keywords:** spiral bevel gears, setting up, tooth grinding machine 5A872B

Конические передачи с круговыми зубьями широко применяются в современном машиностроении. Такие передачи используются, в том числе, в трубопрокатном оборудовании. Они являются наиболее ответственным узлом редукционных станков с дифференциально-групповым приводом, рабочих клеток калибровочных станков и т.д. Обработка таких зубьев выполняется на специальных станках резцовыми головками, имитирующими в своем движении плосковершинное производящее колесо.

Задача технологического синтеза конических передач заключается в подборе таких наладок станка для обработки каждого из колес пары, которые обеспечивали бы размеры, форму и расположение суммарного пятна контакта, удовлетворяющие эксплуатационным требованиям к виброактивности и нагрузочной способности передачи.

К возможным наладкам станка в общем случае относятся: угол профиля резцов, радиус, радиальная установка и наклон шпинделя резцовой головки, осевое и гипоидное смещения заготовки, передаточное отношение цепи обкатки и его модификация. И чем больше из 8-ми пар указанных наладок имеется возможность использовать, тем большую степень сопряженности активных поверхностей можно получить, но тем сложнее взаимосвязь между этими наладками и, главное, тем чувствительней становится передача к неизбежным погрешностям изготовления и сборки. Таким образом, задача технологического синтеза конических передач допускает множество решений, а алгоритмы и программы, передаваемые в производство, должны удовлетворять различным специфическим требованиям конкретных пользователей [1].

Для предприятий индивидуального производства необходимы программные комплексы, позволяющие учесть технологические ограничения, обусловленные характером производства [2, 3, 4]. В частности, универсальный программный комплекс ЭКСПЕРТ, разработанный в МГТУ «Станкин» под руководством д.т.н., профессора Г.И. Шевелевой [2], включает в себя несколько версий с различными критериями оптимизации. Для Электростальского завода тяжелого машиностроения была разработана специальная версия, учитывающая специфику данного предприятия. Опыт разработки и внедрения этой версии освещен в докладе [5].

При адаптации ПК ЭКСПЕРТ к потребностям производства передач на ЭЗТМ комплекс был дополнен двумя специальными программами. Первая из них позволяет заимствовать исходные данные для синтеза непосредственно из ранее разработанного на заводе программного пакета конструкторско-технологической подготовки производства зубчатых передач [6].

С помощью второй программы выполняется пересчет универсальных наладок в установочные параметры конкретных зубообрабатывающих станков [7]. Полученные результаты представляются в