

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИЛАТЕРАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЦЕНКИ И АНАЛИЗА ОТКЛОНЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.А. Печенин, М.А. Болотов, Е.Р. Степанова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В работе проведены измерения координат точек плоской поверхности, обработанной шлифованием, на координатно-измерительной машине. В измеренных точках рассчитаны отклонения от номинальной геометрии и проведены серии экспериментов по фильтрации значений отклонений от погрешности средства измерения. Проведен анализ соответствия отфильтрованной погрешности нормальному закону распределения. Так же проведен корреляционный анализ. Рассмотренный в работе фильтр и анализ результатов его применения реализованы в программном пакете MATLAB и могут быть применены в программном обеспечении измерительных средств при контроле отклонений геометрии различных деталей.

**Ключевые слова:** отклонение формы, билатеральный фильтр, критерий согласия Пирсона, коэффициент автокорреляции.

## Введение

От точности результатов измерения деталей на координатно-измерительной машине (КИМ) зависит точность определения геометрических параметров объекта измерения. Особенно остро задача «точности» возникает при измерении деталей сложной геометрической формы. Измеренная информация представляет собой множество точек в пространстве. При обработке измеренной информации часто возникает необходимость удаления шума, представляющего собой погрешность средства измерения. Для современных контактных КИМ подобная погрешность составляет 0,7-2 мкм, но при измерении сложных криволинейных поверхностей или при несоблюдении нормальных условий измерений данная погрешность может быть выше. При измерении поверхностей с помощью лазерных и оптических средств (например, T-SCAN-CS и COMET 6 фирмы Steinbichler Optotechnik GmbH) величины погрешностей возрастают до 10-50 мкм. Проблемы, связанные с шумоподавлением, возникают при обработке изображений. Существуют обширные исследования и разработано множество алгоритмов шумоподавления именно для задачи обработки изображений, которые могут быть применены для шумоподавления при обработке измеренной информации [1,2].

В данном исследовании проведено измерение координат точек плоской поверхности, обработанной шлифованием, на координатно-измерительной машине (КИМ) DEA Global Performance 07.10.07. В измеренных точках рассчитаны отклонения от номинальной геометрии. Проведено фильтрование рассчитанных отклонений в точках поверхности. Целью работы является определение параметров фильтра, подходящих для работы с измеренными отклонениями.

## Расчет отклонений формы

Измерение плоской поверхности проводилось по 9792 точкам  $u$  (по сетке 153 точек вдоль направления  $x$  и 64 точки вдоль направления  $y$ ). Затем в программном обеспечении

КИМ (PC-DMIS) был произведен расчет отклонений формы  $I(u)$  в данных точках, представляющий собой отклонения измеренных точек от точек на номинальной поверхности.

### Используемый фильтр

Для разделения погрешности на систематическую и случайную (шум) был использован билатеральный фильтр. Билатеральное фильтрование впервые было представлено в работе [3]. Данная техника фильтрации используется в основном в задачах обработки изображений [4,5] и применима для шумоподавления измеренных отклонений.

При работе билатерального фильтра производится вычисление величины отклонения в точке (для цифрового изображения - интенсивностью пикселя), как взвешенного среднего интенсивностей соседних величин отклонений в окрестности радиуса  $r$ . Вес соседних отклонений изменяется в соответствии со значениями расстояний между точками (пространственный вес) и со значением величины отклонений (интенсивности пикселей для изображений) в точках - ранговый фильтр. Наиболее широкое практическое применение получил билатеральный фильтр, основанный на функции Гаусса. Учитывая тот факт, что как правило случайные погрешности измерения подчиняются нормальному закону распределения [6], в работе был использован Гауссов билатеральный фильтр.

Билатеральный фильтр для множества отклонений (изображения)  $I(u)$  в точке определяется по следующей формуле:

$$\hat{I}(u) = \frac{\sum_{p \in N(u)} W_c(\|p - u\|) \cdot W_s(|I(u) - I(p)|) \cdot I(p)}{\sum_{p \in N(u)} W_c(\|p - u\|) \cdot W_s(|I(u) - I(p)|)}, \quad (1)$$

где  $N(u)$  окрестность точки  $u$ ;

$W_c$  - фильтр домена (Гауссов фильтр) с параметром  $\sigma_c$  ( $W_c(x) = e^{-x^2/(2\sigma_c^2)}$ );

$W_s$  - ранговый фильтр (весовая функция подобия) с параметром  $\sigma_s$  ( $W_s(x) = e^{-x^2/(2\sigma_s^2)}$ ).

В практике (и в нашем исследовании), окрестность  $N(u)$  состоит из множества точек  $\{q_i\}$ , для которых выполняется неравенство:

$$\|u - q_i\| < r, \quad (2)$$

где  $r = 2 \cdot \sigma_c$ .

Случайная составляющая отклонения формы, вычисляется соответственно в каждой точке по формуле:

$$e(u) = I(u) - \hat{I}(u). \quad (3)$$

## Инструмент анализа результатов фильтрации

Для определения порогового значения параметров фильтра, исходя из предположения о том, что отфильтрованная составляющая должна носить случайный характер, рассчитывались линейные коэффициенты автокорреляции:

$$\rho_x(n) = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x-n} e(i, j) \cdot e(i+n, j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x-n} e^2(i, j) \cdot \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x-n} e^2(i+n, j)}}, \quad (4)$$

где  $\rho_x(n)$  - линейный коэффициент автокорреляции вдоль направления  $x$ ;

$n$  - лаг автокорреляции, для направления  $x$   $n = 1, \dots, N_x - 1$ .

Аналогично для линейного коэффициента вдоль направления  $y$  -  $\rho_y(n)$ , где  $n = 1, \dots, N_y - 1$ .

Нулевая гипотеза состоит в том, что значение случайной составляющей отклонения в каждой  $i$ -й точке не коррелирует с остальными значениями, то есть  $\rho_x(i) = 0$ .

## Результаты

Для определения случайной составляющей погрешности был применен фильтр с параметрами  $\{\sigma_c = 1; 3; 5\}$  и  $\{\sigma_s = 0,1; 3\}$ . На рис.1 представлены результаты фильтрации измененных отклонений формы в точках поверхности. Случай Ф1 - использованы параметры  $\sigma_c = 1$  и  $\sigma_s = 1$ ; Ф2 -  $\sigma_c = 3$  и  $\sigma_s = 0,1$ ; Ф3 -  $\sigma_c = 5$  и  $\sigma_s = 3$ .

Как видно из результатов на рис.1, в случае Ф3 поверхность после фильтрации получилась наиболее гладкой, однако величина случайной составляющей существенно превышает паспортную погрешность используемой КИМ, что говорит о том, что вместе с шумом мы отфильтровали и полезный сигнал. В любом случае требуется дополнительный анализ полученных результатов для того, чтобы сделать вывод о качестве фильтрации.

Для выявления характера полученных случайных погрешностей измерения была использована проверка на соответствие нормальному закону распределения с помощью критерия согласия Пирсона (критерий согласия  $\chi^2$ ). Нулевая гипотеза ( $H_0$ ) говорит о соответствии распределения массива отфильтрованных отклонений нормальному закону, альтернативная что распределение не соответствует нормальному закону. По данному критерию прошел лишь фильтр с параметрами  $\sigma_c = 3$  и  $\sigma_s = 0,1$ . Так же были рассчитаны коэффициенты автокорреляции  $\rho_x$  и  $\rho_y$  (ф.4). В таблице 1 приведены значения критерия  $\chi^2$ , а так же математические ожидания ( $\mu$ ), максимальные и минимальные значения коэффициентов автокорреляции для проведенной серии экспериментов.

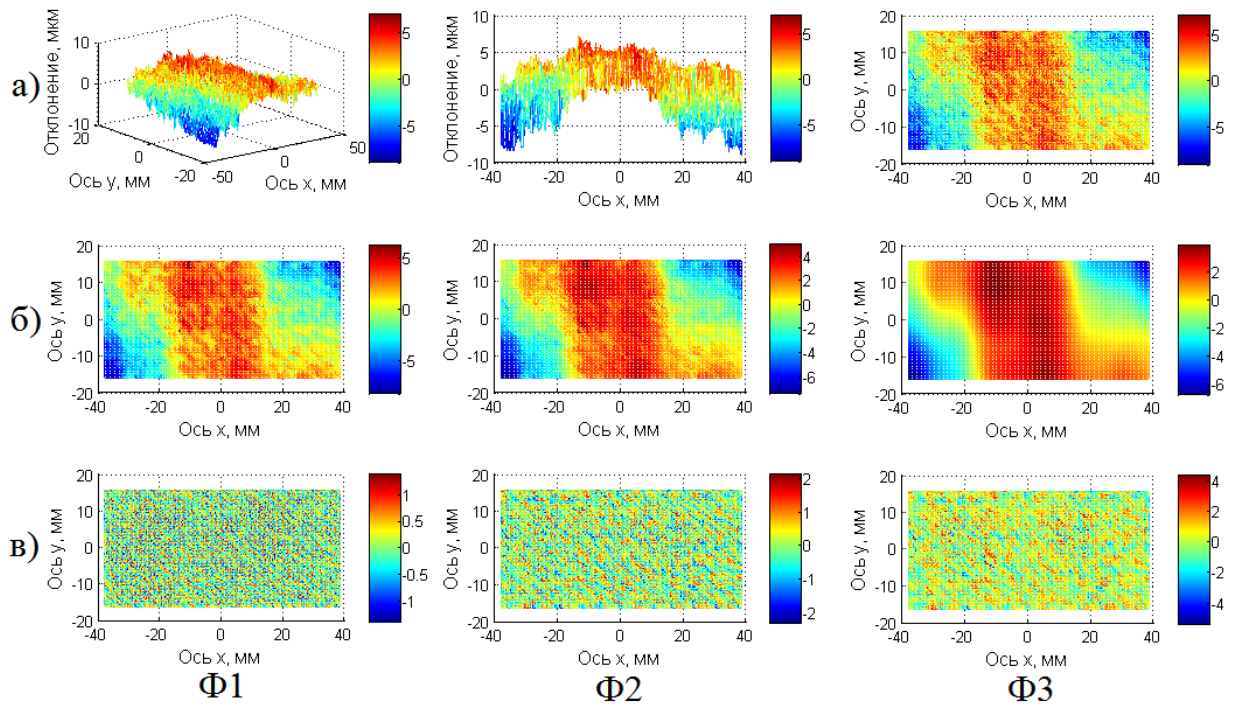


Рис. 1. Результаты применения фильтра для рассчитанных отклонений а); б) - данные после фильтрации, в) - полученный в результате фильтрации шум

Табл. 1. Результаты анализа отфильтрованных шумов

$\sigma_c$	$\sigma_x$	$\chi^2$	$\rho_x$			$\rho_y$		
			М	МИН	МАК	М	МИН	МАКС
			С					
1	0,1	$H_1$	-0,001	-0,013	0,037	0,001	-0,024	0,020
1	1	$H_1$	-0,001	-0,018	0,052	0,001	-0,032	0,029
1	3	$H_1$	-0,001	-0,018	0,052	0,001	-0,032	0,029
3	0,1	$H_0$	0,002	-0,013	0,105	0,003	-0,013	0,051
3	1	$H_1$	0,003	-0,017	0,133	0,004	-0,017	0,065
3	3	$H_1$	0,003	-0,017	0,133	0,004	-0,017	0,065
5	0,1	$H_1$	0,004	-0,014	0,120	0,007	-0,011	0,069
5	1	$H_1$	0,005	-0,018	0,154	0,010	-0,014	0,090
5	3	$H_1$	0,005	-0,018	0,154	0,010	-0,014	0,091

Значения коэффициентов автокорреляции свидетельствуют об очень слабой корреляционной связи величин отклонений. Для оценки значимости корреляции использовался t-критерий Стьюдента. Несмотря на то, что полученный шум (согласно критерию  $\chi^2$ ) строго подчиняется нормальному распределению только в случае  $\Phi 2$ , визуально на гистограммах было рассмотрено что распределения в остальных случаях близки к нормальному. Поэтому результаты t-критерия Стьюдента применимы к рассматриваемым величинам шума [7]. t-статистика для коэффициентов  $\rho$  ( $\rho$  может быть  $\rho_x$  или  $\rho_y$ ) рассчитывается по формуле:

$$t(M - 2) = \sqrt{M - 2} \cdot \rho / \sqrt{1 - \rho^2}, \quad (5)$$

где M - количество точек, используемое для расчета  $\rho$ .

На рис. 2 показано, как критерий  $t(M-2)$  изменяется с лагом  $n$  по направлениям  $x$  и  $y$  для случаев Ф1, Ф2 и Ф3. Критическое значение критерия для достаточного большого  $M$  при уровне значимости 0,05 составляет величину 1,96 (горизонтальная линия на рисунках).

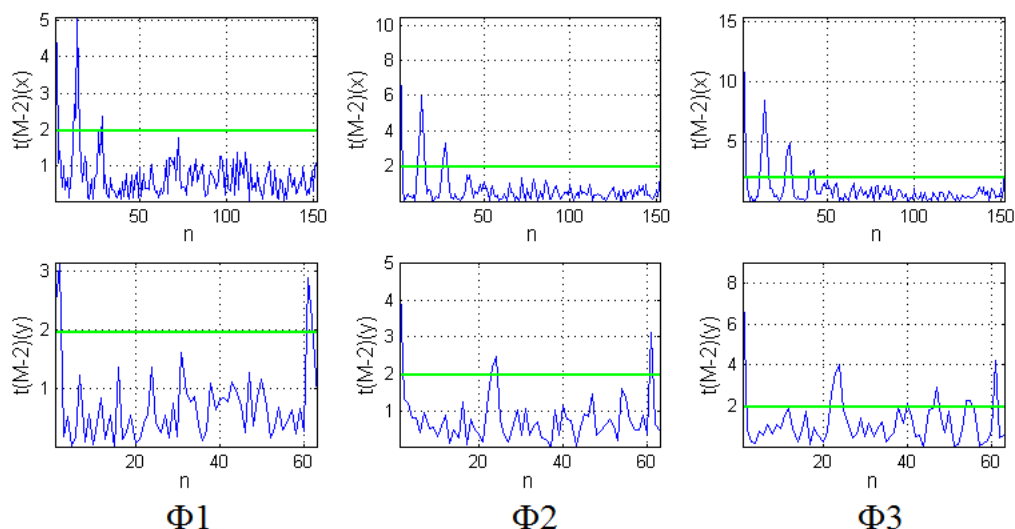


Рис. 2.  $t$ -критерий для коэффициентов автокорреляции

Для рассматриваемых выборок можно сделать вывод о том, что при увеличении параметров  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  вероятностью того, что нулевая гипотеза об отсутствии корреляционной связи неверна, повышается.

## Выводы

В результате работы произведена фильтрация шума при измерении величины отклонений формы прецизионной поверхности. Отклонение формы было получено на этапе измерения поверхности на КИМ DEA Global Performance 07.10.07. Для проведения операции фильтрации были использованы билатеральный фильтр с различными параметрами  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$ . Полученные результаты, а так же их анализ с помощью критерия  $\chi^2$  и автокорреляционной функции свидетельствуют, что применение билатерального фильтра позволяет проводить качественную фильтрацию шума и получать более достоверные данные по измеренным отклонениям при параметрах  $\sigma_c = 3$  и  $\sigma_s = 0,1$ .

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57815X0131. Экспериментальные исследования были выполнены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003).

## Литература

1. Fleishman, S. Bilateral mesh denoising / S. Fleishman, I. Drori, D. Cohen-Or // ACM Transactions on Graphics. – 2003. – Vol. 22, N 3. – P. 950–953.
2. Abdul-Rahman, H.S. Freeform surface filtering using the lifting wavelet transform / H.S. Abdul-Rahman, X.J. Jiang, P.J. Scott // Precision Engineering. - 2013. - Vol. 37, N 1. - P. 187-202.
3. Tomasi, C. Bilateral filtering for gray and color images / C. Tomasi, R. Manduchi // In ICCV. - 1998. - P. 839–846.
4. Eisemann, E. Flash photography enhancement via intrinsic relighting / E. Eisemann, F. Durand // In ACM SIGGRAPH. - 2004. - Vol. 23, N 1. - P. 673-678.
5. Durand, F. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images / F. Durand, J. Dorsey // ACM Transactions on Graphics. - 2002. - Vol. 21, N 3. - P. 257-266.
6. Sprauel, J.M. Uncertainties in CMM measurements, Control of ISO specifications / J.M. Sprauel, J.M. Linares, J. Bachmann, P. Bourdet // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2003. - Vol.52, N 1. - P. 423-426.
7. Sun, X. Noise analysis and synthesis for 3D laser depth scanners / X. Sun, P.L. Rosin, R.R. Martin, F.C. Langbein // Graphical Models. – 2009. - Vol. 71, N 2. - P. 34-48.