

Алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости

Б. Н. МАРКОВ, А. В. ШУЛЕПОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: bnmarkov@rambler.ru

Представлены алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости поверхностей, позволяющие исключить из результатов измерений случайные выбросы и исследовать особенности поверхностей со стратифицированными свойствами. Проанализированы недостатки применения традиционных фильтров Гаусса. Приведены примеры реализации алгоритмов применительно к робастным регрессионным фильтрам Гаусса и сплайн-фильтрам.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, стратифицированные свойства, регрессионный фильтр, сплайн-фильтр, робастная фильтрация.

Presents algorithms for robust filtering profile roughness of the surfaces, is able to release the results of measurements from random outliers and to investigate features of surfaces with stratified properties. The analysis of the shortcomings of traditional Gaussian filter. The examples of algorithms applied to robust regression Gaussian filter and spline filters.

Key words: surface roughness, stratified properties, regression and spline filters, robust filtering.

В стандарте ISO 16610 робастность определяется как нечувствительность выходных данных к некоторым особенностям профиля поверхности во входных данных: выбросам на профилограмме, царапинам, ступенькам и пр. В качестве примера рассмотрим профиль внутренней поверхности гильзы цилиндра. Технология обработки гильз обеспечивает получение структуры поверхности в форме глубоких впадин, которые накладываются на плоские участки (плато). Плато воспринимает реакции опор и силы трения, в то время как впадины служат резервуарами и распределительными

ми цепями для смазки и продуктов трения и износа. Такие поверхности получили название поверхностей со стратифицированными (мультифункциональными) свойствами. Стандартные фильтры Гаусса [1, 2] не в состоянии генерировать достаточно представительные средние линии для отсчета шероховатости профиля таких поверхностей.

Как показано на рис. 1, средняя линия z профиля поверхности гильзы цилиндра, реализуемая фильтром Гаусса с отсечкой шага $\lambda_c = 0,8$ мм, в области впадин локально смещается в их сторону. Впоследствии это искажает характер шероховатости поверхности, вызывая локальные подъемы профиля вокруг впадин. С помощью робастных фильтров удастся преодолеть эти недостатки фильтров Гаусса и построить среднюю линию без учета выбросов.

Еще одна важная проблема, относящаяся к применению робастных фильтров (хотя это прямо и не указано в стандартах ISO), связана с возможностью одновременных измерений отклонений формы и параметров шероховатости. Робастные фильтры должны выделять шероховатость на поверхностях с большими отклонениями формы. Современные измерительные приборы, например, профилометры-контрографы фирмы Mitutoyo, 3D микроординатная измерительная машина фирмы Alicona Imaging GmbH демонстрируют такие возможности, и результаты проводимых с их помощью измерений носят характер многомерной информации. Таким образом, выделение суммарных отклонений в многомерный набор данных о размерах, форме, шероховатости, текстуре поверхности имеет большое значение.

Стандартный фильтр Гаусса наиболее широко применяется в современных измерительных системах — профилографах [1—3]. Весовая функция длинноволнового фильтра (фильтра нижних пространственных частот) определяется через функцию Гаусса

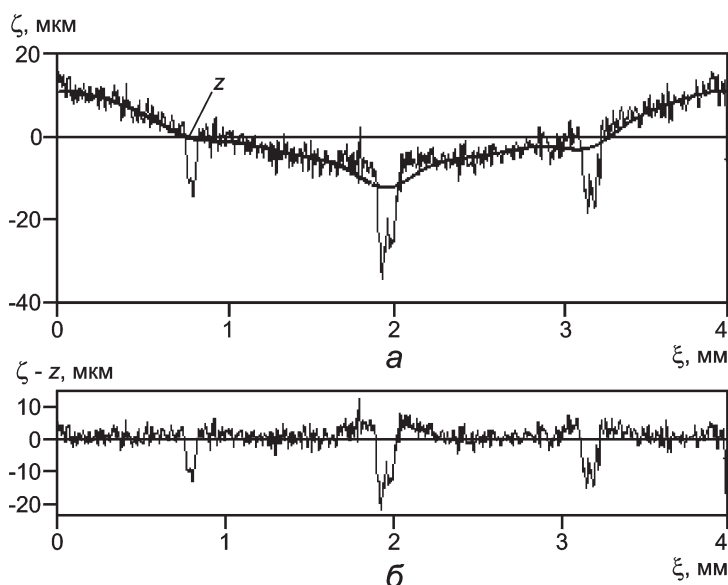


Рис. 1. Исходная профилограмма (а) со средней линией, выделенной фильтром Гаусса с отсечкой шага $\lambda_c = 0,8$ мм, и отклонения от средней линии (б)

$$w(x, \lambda_c) = (\alpha \lambda_c)^{-1} \exp[-\pi(x/(\alpha \lambda_c))^2],$$

где x — координата вдоль профилограммы; λ_c — отсечка шага, т. е. длина волны в составе профиля, пропускаемая через фильтр с коэффициентом передачи, равным 0,5;

$$\alpha = \sqrt{(\ln 2)/\pi} = 0,4697.$$

Весовые функции затухают практически до нуля на длине, равной λ_c . Это приводит к возникновению концевых эффектов: соответствующие участки профилограммы после фильтрации будут искажены, и для обработки профилограммы их нельзя использовать.

Двухступенчатый фильтр Гаусса, представленный в стандарте [4], является результатом эмпирического подхода к анализу поверхностей с послойным распределением функциональных свойств. На первом этапе используется стандартный фильтр Гаусса для построения средней линии профиля, затем из состава профилограммы исключают все грубые выбросы от средней линии, используя соответствующие критерии обработки результатов измерений. Модифицированный профиль, в котором отброшенные участки заменены соответствующими участками средней линии, повторно фильтруется тем же фильтром Гаусса. В результате получается новая средняя линия, которая и используется для оценки параметров шероховатости.

Хотя этот метод в некоторых случаях достаточно эффективен, он имеет несколько ограничений. Во-первых, выбор подходящего критерия обнаружения выбросов требует длительных статистических исследований. Во-вторых, отсеивание выбросов сокращает объем данных, содержащихся в профилограмме: обычно для оценки параметров шероховатости остается от 20 до 60 % профилограммы [5].

Регрессионный фильтр Гаусса является производным от процедуры фильтрации, предложенной в [6] для такого сглаживания зашумленных широкополосных данных, при котором лучше сохраняются высокочастотные компоненты сигнала. В результате высота всплесков сигнала остается практически без изменения. Весовая функция длинноволнового регрессионного фильтра Гаусса 2-го порядка с отсечкой шага λ_c лишь немного отличается от весовой функции стандартного фильтра Гаусса [7]:

$$w(x, \lambda_c) = \frac{1}{\lambda_c} \left[\frac{3}{2} - \frac{\pi^2}{\beta} \left(\frac{x}{\lambda_c} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{\beta} \left(\frac{x}{\lambda_c} \right)^2 \right],$$

где $\beta = 1 - W_{-1}[-(2e)^{-1}]$; $W_{-1}(\cdot)$ — функция Ламберта.

На рис. 2 для сравнения показаны весовые функции стандартного и регрессионного фильтров Гаусса при одной и той же отсечке шага $\lambda_c = 0,8$ мм. Весовая функция регрессионного фильтра оказывается более острой и высокой и поэтому имеет участок с отрицательными значениями, что и определяет особенности фильтрации профиля этим фильтром.

Робастные регрессионные фильтры Гаусса. Частотные фильтры Гаусса минимизируют средний квадрат расхождения между исходной профилограммой и результатом ее фильтрации при заданных частотных свойствах фильтра. В робастных фильтрах Гаусса [8] используют другие подходы, позволяющие устранить влияние резких отклонений профиля от средней линии. Здесь используется функция Тьюки

$$\psi(x) = \begin{cases} (1 - (x/C)^2)^2 & \text{при } |x| \leq C; \\ 0 & \text{при } |x| > C, \end{cases} \quad (1)$$

где $x = \zeta - z$ — расхождение между текущей ординатой профиля ζ и ординатой z результата фильтрации; C — пороговая константа, равная утроенному стандартному отклонению 3σ этих расхождений, в стандартах ISO ее принято определять через медиану абсолютных значений расхождений как $C = 4,4478 \text{ median}(|x|)$.

Процедура фильтрации осуществляется рекурсивно за несколько итераций.

1. Проводится фильтрация профиля стандартным или регрессионным фильтром Гаусса, определяются расхождения $x = \zeta - z$ между первичным профилем и результатом фильтрации.

2. Вычисляются модули расхождений $r_n = |x_n| = |\zeta_n - z_n|$, их медиана $\text{median}(r)$, пороговая константа C и поправочные коэффициенты

$$\delta_n = \begin{cases} (1 - (r_n/C)^2)^2 & \text{при } |r_n| \leq C; \\ 0 & \text{при } |r_n| > C. \end{cases} \quad (2)$$

В большинстве случаев поправочные коэффициенты близки к единице, но при значительных отклонениях профиля они уменьшаются и там, где отклонения профиля превышают 3σ , обращаются в нуль (как раз в области выбросов).

3. Корректируется профиль путем умножения на поправочные коэффициенты. В результате получается профиль, практически свободный от случайных или специально созданных выбросов.

4. Обрабатывается скорректированный профиль тем же фильтром Гаусса. После второй итерации результаты оказываются вполне приемлемыми (рис. 3).

Последующие итерации приводят лишь к незначительному улучшению результатов. Если же выбросы не столь велики, то может понадобиться три-четыре итерации.

Сплайн-фильтры. В целях преодоления концевых эффектов было предложено заменить фильтр Гаусса сплайн-фильтром, обеспечивающим сплайн-аппроксимацию профиля [9]. В этом цифровом фильтре процедура фильтрации сводится к решению матричного уравнения. Позднее была разработана методика построения робастного сплайн-фильтра, в меньшей степени подверженного влиянию выбросов [10]. Характеристики сплайн-фильтров регламентированы в [11].

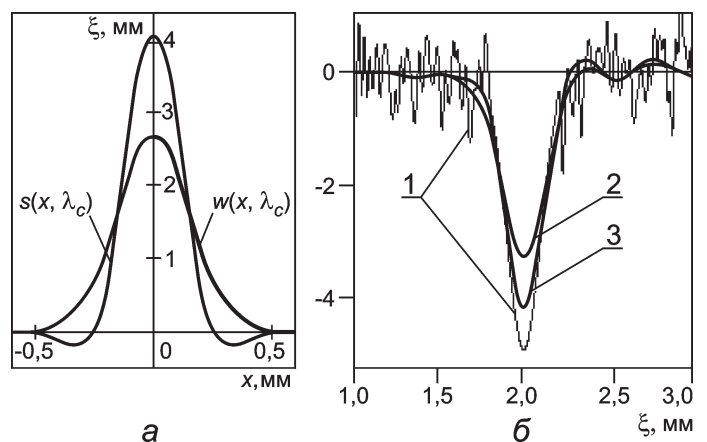


Рис. 2. Весовые функции регрессионного $s(x, \lambda_c)$ и стандартного $w(x, \lambda_c)$ фильтров Гаусса (а) и результаты фильтрации (б):

1 — исходный профиль со впадиной; 2, 3 — средние линии при использовании стандартного и регрессионного фильтров Гаусса

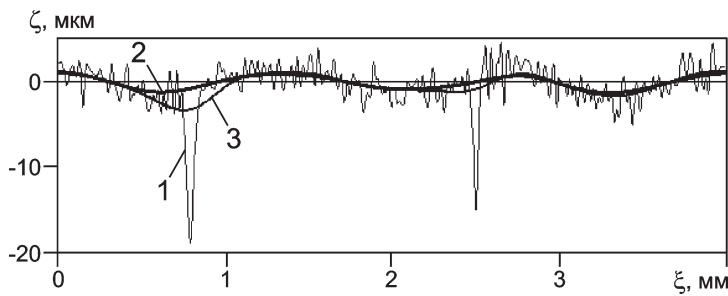


Рис. 3. Результаты робастной фильтрации при $\lambda_c = 0,8$ мм после двух итераций:

1 — исходный профиль; 2, 3 — средние линии после робастной и стандартной фильтраций

Замкнутого аналитического выражения для весовой функции сплайн-фильтра получить не удастся, поэтому приходится пользоваться алгебраическим уравнением для отфильтрованного профиля:

$$(I + \alpha^4 Q) \mathbf{w} = \mathbf{z}, \quad (3)$$

где I — единичная матрица размером $N \times N$; N — число дискретных отсчетов на профилограмме; Q — матрица размером $N \times N$, структуру которой можно увидеть на примере матрицы 10×10 :

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 5 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 5 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix};$$

$\alpha = [2 \sin(\pi \Delta x / \lambda_c)]^{-1}$ — параметр, определяющий частотные (волновые) свойства фильтра; Δx — шаг дискретизации профиля; $\mathbf{z}$, $\mathbf{w}$ — векторы измеренных и отфильтрованных значений высот профиля.

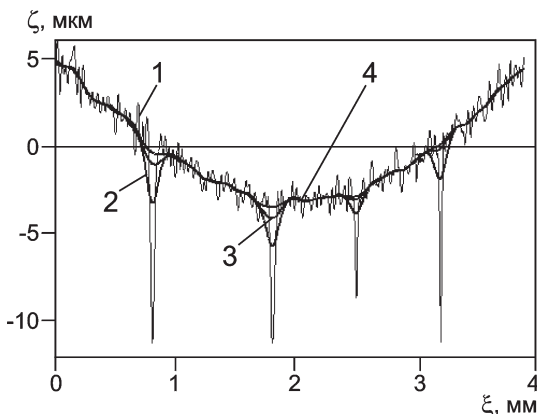


Рис. 4. Определение средней линии профиля робастным сплайн-фильтром при $\lambda_c = 0,25$ мм:

1 — исходный профиль; 2, 3, 4 — результаты первого приближения и двух последующих итераций

Вектор, определяющий результат фильтрации, находится решением приведенного выше матричного уравнения.

Робастные сплайн-фильтры. Здесь так же, как и при использовании робастных регрессионных фильтров, используется функция Тьюки (1) [12].

Процедура фильтрации осуществляется рекурсивно за несколько итераций.

1. Проводится фильтрация профиля обычным сплайн-фильтром путем решения матричного уравнения (3) и определяются модули r расхождений между первичным профилем $\mathbf{z}$ и первым приближением $\mathbf{w}$ к результату фильтрации: $r_n = |w_n - z_n|$.

2. Вычисляются медиана $\text{median}(r)$, S и поправочные коэффициенты по (2).

3. Составляется диагональная матрица поправок, элементы которой имеют вид

$$\delta M_{n,m} = \begin{cases} \delta_n & \text{при } n=m; \\ 0 & \text{при } n \neq m. \end{cases}$$

4. Проводится первая итерация и получается первое приближение к результату фильтрации путем решения матричного уравнения

$$(\delta M + \alpha^4 Q) \mathbf{w}_1 = \delta \mathbf{z},$$

где $\delta \mathbf{z}$ — вектор, получаемый при поэлементном перемножении векторов δ , $\mathbf{z}$; $\mathbf{w}_1$ — результат первой итерации — второе приближение к результату фильтрации.

5. Выполняются последующие итерации с уточнением результата фильтрации (рис. 4); итерации лишь незначительно уточняют результат фильтрации: средняя линия оказывается нечувствительной к глубоким рискам на профиле. Концевые эффекты отсутствуют, как и при использовании неробастного сплайн-фильтра.

Морфологические фильтры — это нелинейные алгоритмы преобразований профиля, обладающие робастными свойствами и реализуемые методами обработки бинарных изображений [13]. Вначале профилограмма должна быть представлена в форме изображения, на котором профиль изделия отделяет материал изделия от окружающей среды (воздуха). Далее изображение преобразуется в бинарное и обрабатывается с помощью таких операций, как дилатация, эрозия, открытие и закрытие с привлечением некоего структурирующего элемента, реализующего измерительный зонд в форме сферы (диска) или ножа (отрезка прямой линии). Результат фильтрации получается как огибающая последовательности положений зонда заданного радиуса, возникающих при ошупывании поверхности.

Огибающие профиля изделия могут быть построены как снаружи, так и изнутри изделия с помощью определенной вычислительной процедуры, которая и называется морфологической фильтрацией. В результате становится возможным проведение многомерного анализа при построении системы огибающих, соответствующих различным диаметрам наконечника. В последнее время идеи морфологической фильтрации начинают распространяться и на анализ 3D-шероховатости.

Работа проведена на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на

№ 9.2545.2014/К, соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Л и т е р а т у р а

1. **ISO 11562:1996.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Метрологические характеристики фильтров с коррекцией фазы.
2. **ISO 16610-21:2011.** Geometrical product specifications. Filtration. Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters.
3. **ГОСТ Р 8.652—2009.** Метрологические характеристики фазокорректированных фильтров.
4. **ISO 13565-1:1996.** Geometrical Product Specifications. Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 1: Filtering and general measurement conditions.
5. **Jiang X.** Robust solution for the evaluation of stratified surfaces // CIRP — Annals — Manufacturing Technology. 2010. V. 59. N 1. P. 573—576.
6. **Savitzky A., Golay M. J. E.** Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures // Anal. Chem. 1964. V. 36(8). P. 1627—1639.
7. **Seewig J.** Linear and robust gaussian regression filters // J. Physics: Conf. Ser. 2005. V. 13. P. 254—257.

8. **ISO/TS 16610-31:2010.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Филтрация. Часть 31. Фильтры робастного профиля: Гауссовы регрессионные фильтры.

9. **Krystek M.** Form filtering by splines // Measurement. 1996. V. 18. P. 9—15.

10. **Goto T., Miyakura J., Umeda K.** A robust spline filter on the basis of L2-norm // Precision Eng. 2005. V. 29. P. 151—161.

11. **ISO/TS 16610-22:2006.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Филтрация. Часть 22. Фильтры линейного профиля: Сплайн-фильтры.

12. **ISO/TS 16610-32:2009.** Geometrical product specification. Filtration. Part 32: Robust profile filters: Spline filters.

13. **ISO/TS 16610-40:2006.** Geometrical product specifications. Filtration. Part 40: Morphological profile filters: Basic concepts.

14. **Латонов И. В., Шулепов А. В.** Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // Вестник МГТУ «Станкин». 2013. № 1. С. 141—145.

15. **Конов С. Г., Марков Б. Н.** Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.

Дата принятия 15.04.2015 г.

621.914.1.004.58:621.9.06.529

Диагностика и контроль керамического инструмента при высокоскоростном фрезеровании закаленных сталей на станках с ЧПУ

С. Н. ГРИГОРЬЕВ, М. А. ВОЛОСОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: science@stankin.ru, rector@stankin.ru

Показаны принципы работы алгоритма комплексного диагностирования и контроля состояния керамического инструмента при фрезеровании закаленных сталей. Алгоритм для распознавания износа инструмента основан на использовании силовых параметров, а для распознавания скалывания — виброакустического сигнала. Приведена обобщенная структура подсистемы диагностирования и контроля состояния керамического инструмента в составе системы ЧПУ фрезерного станка.

Ключевые слова: диагностика, керамический инструмент, фрезерование, износ инструмента, силовые параметры, виброакустический сигнал, система ЧПУ.

The principles of the algorithm for integrated diagnostics and control of ceramic tool state during milling of hardened steels are considered. The algorithm is based on the use of force parameters for detecting the wear and of vibro-acoustic signals for recognition of chipping. A generalized structure of subsystem for diagnostics and control of the state of ceramic tool as a part of CNC system of milling machine.

Key words: diagnostics, ceramic tool, milling, tool wear, force parameters, vibro-acoustic signal, CNC system.

В современном промышленном производстве особо актуальна проблема непрерывной эксплуатации прогрессивного технологического оборудования, т. е. простои из-за нарушения работы системы должны быть сведены к минимуму. Это возможно только при обеспечении высокой надежности всех компонентов автоматизированных систем, а также сокращения времени восстановления работоспособного состояния элементов технологической системы, которое,

в свою очередь, напрямую зависит от степени повреждения при несвоевременном отказе режущего инструмента. С внедрением диагностики состояния режущего инструмента и обработанных поверхностей в процессе резания связано развитие автоматизированного металлообрабатывающего производства. Диагностика особенно важна при эксплуатации высокотехнологического оборудования с ЧПУ, предназначенного для обработки сложных корпусных деталей, так как