

И. А. Выхристюк^{1}, Е. В. Сысов¹, Р. В. Куликов¹*

Повышение достоверности высокоточных измерений рельефа поверхности в условиях производственного цеха

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: uic@ngs.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние внешних вибраций, случайно возникающих в процессе сканирования поверхности оболочек твэлов, на результат измерения глубины дефектов методом дифференциальных интерферограмм. Предложены программно-алгоритмические способы снижения этого влияния. Выполнена оценка улучшения достоверности контроля от применения предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: автоматические измерения, глубина дефекта, интерференционная профилометрия, 3D-модель поверхности, вибрации

I. A. Vykhristyuk^{1}, E. V. Sysoev¹, R. V. Kulikov¹*

Increasing the Reliability of High-Precision Measurements of the Surface Relief in Conditions of the Production Shop

¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: uic@ngs.ru

Abstract. The effect of external vibrations that randomly occur during scanning of the surface of fuel shells on the result of measuring the depth of defects by the method of differential interferograms is considered. Software-algorithmic ways to reduce this influence are proposed. An assessment was made of improving the reliability of control from the use of the proposed methods.

Keywords: automatic measurements, defect depth, interference profilometry, 3D surface model, vibrations

Введение

При проведении измерений в экстремальных условиях могут возникать различные случайные помехи, приводящие к ошибке измерения, существенно превышающей величину погрешности прибора. Человек, выполняющий измерение «вручную», по характеру измеренных данных может заметить такие неточности и произвести повторное измерение. В случае автоматических измерений контролировать результат нужно также автоматически.

Для измерения глубины дефектов на внешней поверхности оболочек твэлов наиболее подходящей технологией является интерференционная профилометрия [1]. Преимущества ее заключаются в бесконтактности и потенциально высокой точности и пространственной разрешающей способности [2]. Недостатком является требование жесткой связанности объекта измерения с интерферометром,

что накладывает дополнительные требования на конструкцию и объект или на условия измерения (необходимо отсутствие низкочастотных вибраций).

Разработанная в КТИ НИ СО РАН система автоматического контроля внешнего вида оболочек твэлов (далее – Система) [3, 4] предназначена для автоматического обнаружения дефектов внешнего вида [5] и, при необходимости, измерения их глубины [6].

При измерении рельефа фрагментов поверхности оболочек твэлов, представляющих собой трубы диаметром порядка 10 мм и длиной 3–5 метров, обеспечить жесткую связь измеряемой поверхности с интерферометром чрезвычайно сложно. Также сложно виброизолировать часть производственной линии, отвечающей за измерения, в силу большой протяженности оболочки, наличия автоматической подачи и высоких требований к скорости контроля (измерения нужно производить независимо от состояния транспортной системы).

В процессе опытной эксплуатации Системы было замечено, что заложенные при разработке конструктивные решения по виброизоляции успешно подавляют вибрации, связанные с работой производственной линии. Тем не менее, в результатах измерений эпизодически появлялись ошибки, связанные со смещениями оболочки, относительно интерферометра в процессе измерения, приводящие к браковке годных изделий. Эти перемещения были вызваны низкочастотными вибрациями, возникающими от движения кран-балки или от проезда вблизи Системы тележек с тяжелым грузом.

В представленной работе проведен анализ влияния вибраций на данные, используемые для измерения рельефа поверхности методом дифференциальных интерферограмм [7, 8], предложены способы снижения этого влияния и представлена оценка улучшения достоверности измерений при использовании предложенных решений.

Измерение рельефа поверхности

При измерении рельефа методом дифференциальных интерферограмм производится измерение расстояния от условной плоскости до участков поверхности, соответствующих каждому пикселю видеокамеры профилометра. Для этого выполняется сканирование интерферометром вдоль его оптической оси. На каждом шаге сканирования k по двум интерферограммам $I_{1,k}$ и $I_{2,k}$, для которых положения сканирования $z_{1,k}$ и $z_{2,k}$, соответственно, отличаются приблизительно на половину эффективной длины волны источника света интерферометра, строится дифференциальная интерферограмма:

$$D_k(x, y) = \left| I_{1,k}(x, y) - I_{2,k}(x, y) \right|, \quad (1)$$

где $D_k(x, y)$ – значение сигнала дифференциальной интерферограммы, $I_{1,k}(x, y)$ и $I_{2,k}(x, y)$ – значение яркости противофазных интерферограмм на шаге k в точке (x, y) – номера пикселей матрицы видеокамеры по горизонтали и вертикали, соответственно.

При вычитании противофазных интерферограмм для пикселей, в которых интерференция не наблюдается, значение D будет на уровне шума видеосигнала. А при наличии интерференции противоположные фазы при вычитании дадут удвоенную амплитуду сигнала.

По дифференциальной интерферограмме на шаге k для каждого пикселя при наличии интерференционного сигнала [9] инкрементируются изначально заполненные нулями массивы взвешенной суммы позиций Zw и суммы весов W :

$$\begin{aligned} \text{если } D_k(x, y) > \sqrt{(I_{1,k}(x, y) + I_{2,k}(x, y)) / 2}, \text{ тогда} & \quad (2) \\ Zw(x, y) := Zw(x, y) + D_k(x, y) \cdot z_k, \text{ где } z_k = (z_{1,k} + z_{2,k}) / 2, \\ W(x, y) := W(x, y) + D_k(x, y). \end{aligned}$$

После завершения процесса сканирования заполняется массив рельефа Z :

$$\begin{aligned} \text{если } W(x, y) = 0, \text{ тогда } Z(x, y) = 0, & \quad (3) \\ \text{иначе } Z(x, y) := Zw(x, y) / W(x, y). \end{aligned}$$

То есть, высотой рельефа в пикселе считается средневзвешенная координата сканирования, весом для вычисления которой является величина сигнала дифференциальной интерферограммы. Если в пикселе по какой-нибудь причине интерференционный сигнал не наблюдался, то значению высоты рельефа в этой точке присваивается некоторая специальная величина, в приведенном примере это ноль.

По массиву рельефа строится карта отклонений $H(x, y)$ от базовой цилиндрической поверхности [6]. Глубина дефекта определяется как максимальная по модулю величина отклонения.

Влияние вибраций на результат измерения

Неконтролируемые смещения объекта измерения относительно интерферометра в процессе сканирования приводят к воздействиям на измерительные данные, которые можно разделить на два типа, в соответствии с направлением сдвигов – продольным или поперечным.

Для продольных сдвигов также можно выделить два типа воздействия. Даже небольшие смещения, порядка длины волны, произошедшие между регистрацией противофазных интерферограмм, могут привести к снижению уровня регистрируемого интерференционного сигнала D (1), что внесет вклад в ошибку определения высоты (2) [8]. При величине продольного сдвига на шаге k больше длины волны (безотносительно того, когда произошел сдвиг, до регистрации $I_{1,k}$ или между регистрацией $I_{1,k}$ и $I_{2,k}$) дополнительная ошибка будет связана с несоответствием содержимого интерферограмм $I_{1,k}$ и $I_{2,k}$ координатам сканирования $z_{1,k}$ и $z_{2,k}$.

Поперечные смещения в общем случае приводят к тому, что результат измерения Z (3) усредняется по площади, что может привести к ошибке при опре-

делении глубины дефектов с малым поперечным размером дна. Но на практике наиболее весомым оказалось влияние поперечных смещений на определение высоты участков поверхности, в которых интерференционный сигнал в отсутствие вибраций не регистрировался вообще (3).

Если соседние участки поверхности обладают различной степенью рассеивания света, поперечные смещения, произошедшие между регистрацией противофазных интерферограмм, приведут к появлению ложного интерференционного сигнала, так как в дифференциальной интерферограмме наличие интерференционного сигнала регистрируется по изменению яркости пикселя (1).

Для пикселей, в которых в процессе сканирования интерференционный сигнал уверенно регистрируется, такое воздействие будет приводить к «утягиванию» измеренной высоты в сторону координаты сканирования, на которой произошел сдвиг (2). Для пикселей, в которых интерференция не наблюдалась или едва превышала уровень шума, воздействие может привести к появлению в измеренном рельефе поверхности вместо пропусков (неизмеренных областей) пиков произвольной (во всем диапазоне сканирования) высоты.

Продольная фильтрация

На рис. 1 приведена экспериментально полученная зависимость сигнала D_k дифференциальной интерферограммы в некотором пикселе (x, y) от координаты сканирования z_k (2). Пиксель соответствует краю неглубокой царапины, поэтому даже при небольших смещениях, направленных перпендикулярно краю, возникают ложные сигналы. В графике отмечены уровни 54,1 и 70,7 мкм, равные значениям средневзвешенной суммы координаты сканирования, вычисленной с учетом ложных сигналов и без учета, соответственно.

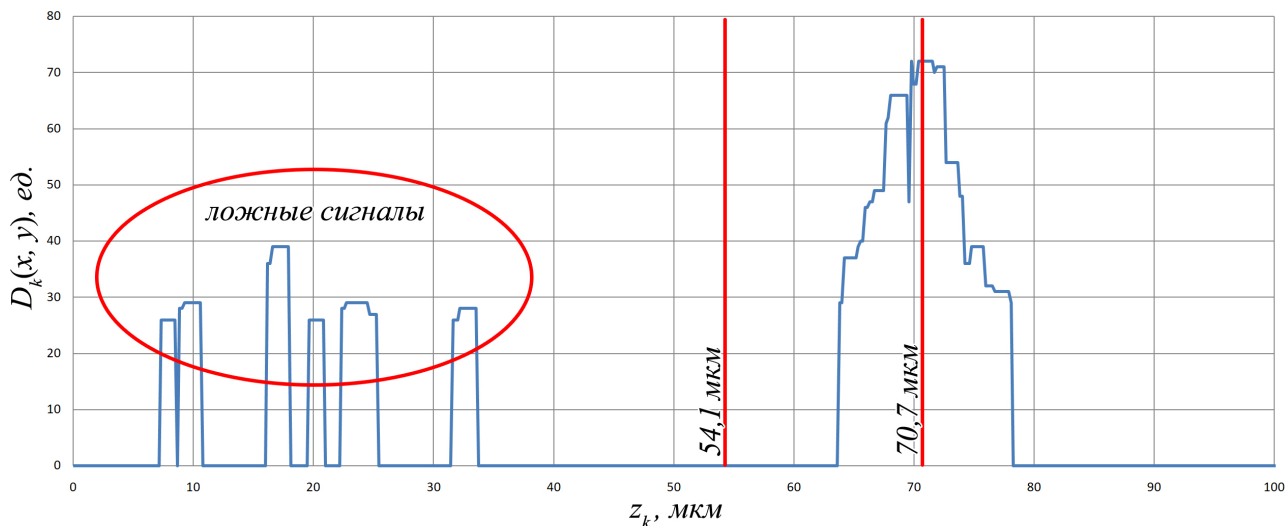


Рис. 1. Зависимость регистрируемого в точке интерференционного сигнала от координаты сканирования

Ложные сигналы в координатах сканирования между 7 и 35 мкм вызваны поперечными смещениями оболочки относительно интерферометра. Просадка уровня D около 70 мкм также связана с вибрациями, приведшими к продольному сдвигу.

Для уменьшения влияния ложных сигналов на средневзвешенную сумму координаты сканирования предложен следующий алгоритм фильтрации $D_k(x, y)$ по шагам сканирования k :

1. создаются массивы $Bz(x, y, n)$ и $Bw(x, y, n)$ для хранения информации об обнаружении интерференционного сигнала в каждой точке на N_{max} возможных обнаружений ($n \in \{1, 2, \dots, N_{max}\}$); создается заполненный нулями массив $N(x, y)$ для хранения количества обнаружений в каждой точке;

2. при обнаружении на шаге k в пикселе (x, y) сигнала $d = D_k(x, y)$ производится инкрементация значения $N(x, y)$ и запись значений $Bz(x, y, n) := z_k$, $Bw(x, y, n) := d$, где $n = N(x, y)$;

3. по окончании сканирования в каждой точке производится фильтрация:

3.1 если $N(x, y)$ меньше заданного порога $ThrN$, точка признается неизмеренной, конец фильтрации;

3.2 производится объединение близко расположенных записей, для этого определяются группы номеров записей:

3.3

$$G_m = \left\{ n_1, \dots, n_{N_m} \mid N_m > ThrN \text{ и для всех} \right. \\ \left. k \in \{1, \dots, N_m - 1\} \mid |Bz(x, y, n_k) - Bz(x, y, n_{k+1})| < ThrZ \right\}, \\ m \in \{1, \dots, M\},$$

где $ThrZ$ определяет допустимое расстояние между записями, чтобы относить их к одному сигналу, M – количество групп; остальные записи игнорируются; по каждому множеству G_m считается качество группы и находится максимум качества:

$$q_m = |Bz(x, y, n_{N_m}) - Bz(x, y, n_1)| \cdot \sum_{n \in G_m} Bz(x, y, n), \\ q_{max} = \max \{ q_m \mid m \in \{1, \dots, M\} \};$$

группы с качеством меньше трети от q_{max} игнорируются; если остается не одна группа – точка признается неизмеренной, конец фильтрации;

3.4 для определения средневзвешенной суммы координат в точке используются только записи оставшейся группы.

Предложенная фильтрация хорошо работает для точек с уверенным обнаружением интерференционного сигнала, так как ложные сигналы от вибраций легко отделяются от качественной группы настоящего сигнала. Но точки с низким уровнем сигнала, которые раньше измерялись, теперь могут быть признаны неизмеренными. Также для точек с отсутствием или низкой интенсивностью

настоящего сигнала плотная группа ложных сигналов может пройти фильтрацию и привести к браковке изделия.

Поперечная фильтрация

Для точек, в которых зарегистрирован только ложный интерференционный сигнал, продольная фильтрация может не дать желаемого результата. В таком случае в измеренном рельефе на месте этих точек будут находиться участки поверхности произвольной высоты.

Анализ результатов измерения, приведших к браковке продукции, показал, что для естественных дефектов поверхности оболочек твэлов поперечные размеры более чем в 2 раза превышают глубину/высоту. При пороговых значениях глубины – 30 мкм и высоты – 20 мкм можно утверждать, что углубления соответствующие браку имеют минимальный поперечный размер 60 мкм, а выступы – 40 мкм.

Исходя из этих данных, предложено сделать пространственный фильтр измеренного 3D рельефа поверхности, работающий по следующему алгоритму:

- 1) по карте $H(x, y)$ отклонений от базовой поверхности определяется точка максимального отклонения;
- 2) если отклонение не приводит к браку – конец работы фильтра;
- 3) при помощи алгоритма заливки определяется форма и вычисляется поперечный размер углубления/выступа;
- 4) если поперечный размер меньше минимального, то вся площадь «дефекта» удаляется из рельефа, как будто сигнал в этих точках не регистрировался: $Z(x, y) := 0, H(x, y) := 0$;
- 5) переход к первому шагу алгоритма.

Предложенный фильтр не устранит ложный пик, если тот будет находиться внутри неглубокого, широкого дефекта, дно которого плохо рассеивает свет, так как поперечный размер будет определен по настоящему дефекту, а глубина/высота по ложному пику, но на данный момент таких совпадений не зафиксировано.

Оценка улучшения достоверности результатов измерений

В силу случайного характера появления вибраций (во время контроля партии оболочек твэлов другие работы в цеху могут не проводиться, а могут вестись с повышенной интенсивностью) сложно количественно точно оценить влияние использования предложенных фильтров на снижение уровня ложного брака.

Проанализировав результат штатного контроля 1000 оболочек до введения фильтрации, мы получили следующие цифры: из более чем 400 выполненных измерений 34 измерения (~8,5%) привели к ложной браковке из-за вибраций.

После введения постобработки измерительных данных на основе предложенных алгоритмов фильтрации запротоколирован контроль 200 оболочек. Выполнено более 200 измерений, ложной браковки не выявлено.

Заключение

Проведен анализ влияния низкочастотных вибраций на результат оптических интерференционных измерений рельефа поверхности.

Предложены алгоритмы фильтрации измерительных данных, снижающие влияние на результат измерения как продольных, так и поперечных случайных смещений объекта относительно интерферометра.

Анализ результатов штатного контроля продукции, выполненного до и после добавления предложенных фильтров, показал существенное улучшение достоверности контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Optical measuring and laser technologies for scientific and industrial applications / Y. V. Chugui, A. G. Verkhoglyad, P. S. Zavyalov [et al.] // . – 2015. – Vol. 9, No. 5. – P. 515–524. DOI 10.20965/ijat.2015.p0515.

2. Measuring the Interatomic Distance in a Silicon Crystal Lattice Using an Optical Scanning Interferometer / E. V. Sysoev, A. V. Latyshev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Vol. 57, No. 6. – P. 561–568. DOI 10.3103/S8756699021060157.

3. Система автоматического контроля внешнего вида оболочек твэлов / И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов // Датчики и системы. – 2021. – № 4(257). – С. 17–21. DOI 10.25728/datsys.2021.4.3.

4. Автоматический контроль качества поверхности труб (оболочек) / Е. В. Власов, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов [и др.] // Приборы. – 2020. – № 12(246). – С. 30–37.

5. Использование нейросетевых технологий для автоматизации контроля внешнего вида твэлов реакторов БН-800 / И. А. Выхристюк // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 88–96. DOI 10.33764/2618-981X-2020-8-1-88-96.

6. Высокоточные измерения глубины дефектов на поверхности цилиндрических промышленных изделий / И. А. Выхристюк, Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 60–65. DOI 10.33764/2618-981X-2022-8-1-60-65.

7. Интерференционный микроскоп-профилометр / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов [и др.] // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 119–128.

8. Влияние случайного сдвига фазы интерферограмм на погрешность измерений рельефа поверхности интерференционным профилометром / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 28–31.

9. Адаптивная пороговая обработка дифференциальных интерферограмм / Е. В. Сысоев, А. К. Поташников // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 20–25.

© И. А. Выхристюк, Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, 2023