

И.Г. Половцев, С.А. Чудинов

## ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ БОЛЬШОЙ АПЕРТУРЫ ПО МЕТОДУ ПЕРЕНАЛОЖЕНИЙ

Институт оптического мониторинга СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 12.05.98 г.

Принята к печати 15.07.98 г.

Показано, что при контроле формы высокоапертурной поверхности по методу переналожений измерительная база прибора может быть представлена как фильтр пространственных частот. При этом комплексная амплитуда фильтра описывается функцией, параметры которой определяются размером измерительной базы и конфигурацией измерительного устройства. Даны результаты, подтверждающие целесообразность использования этой модели в практических измерениях.

В практике оптических измерений метод переналожений встречается достаточно часто [1–5]. Суть его заключается в том, что исследуемая поверхность (рис. 1) большой апертуры разбивается на  $k$  участков, на каждом из которых последовательно осуществляется контроль с помощью прибора малой апертуры. Суммарная ошибка  $\Delta N$  профиля всей поверхности зависит от числа стоянок  $k$  и оценивается [1] с помощью следующего равенства:

$$\Delta N = \Delta n \sqrt{k},$$

где  $\Delta N$  – ошибка оценки профиля на одной стоянке.

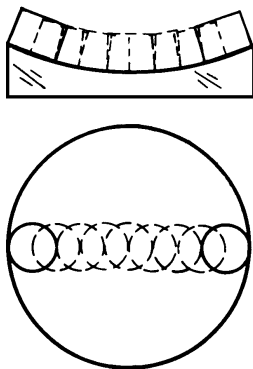


Рис. 1. Схема контроля высокоапертурной поверхности с помощью малых апертур

Причина снижения точности измерений – это потеря информации о положении в пространстве измерительной базы (элементарной апертуры), вследствие этого происходит фильтрация пространственных частот в форме исследуемой поверхности и возникает необходимость «связки» результатов отдельных элементарных измерений. Методика и алгоритмическое обеспечение процедуры «связки» являются темой большинства работ по методу переналожений [6–9]. Не менее интересными, с точки зрения использования, являются фильтрующие свойства элементарной апертуры.

Интерференционные и теневые схемы контроля формы поверхности, традиционно используемые в оптическом

приборостроении, можно отнести к интегральным в том смысле, что результатом контроля является информация об отклонении всей контролируемой поверхности в целом от какой-то номинальной поверхности сравнения. С этой точки зрения схему контроля по методу переналожений следует отнести к дифференциальным методикам. В этом случае само понятие форма (профиль) поверхности становится неопределенным, поскольку можно говорить только о какой-то реализации такового, зависящей от случайных факторов, связанных с выбором поверхности сравнения в каждой конкретной стоянке элементарной апертуры. Ввиду особой роли последней далее будем называть эту элементарную апертуру измерительной базой.

Поскольку в процессе переналожений измерительная база меняет свою ориентацию в пространстве, следует ожидать, что часть информации об измеряемой поверхности будет утеряна. Потерянная информация связана с крупномасштабными изменениями профиля, однако информация о мелких изменениях будет выявлена достаточно подробно. Таким образом, можно предположить, что в процессе измерений по методу переналожений осуществляется фильтрация пространственных частот измеряемого рельефа.

Фильтрующие свойства измерительной базы не всегда являются отрицательным моментом. Имея априорную информацию о спектре пространственных частот, можно так выбрать размер измерительной базы, что вся требуемая информация о качестве поверхности будет сохранена.

Рассмотрим рис. 2. Пусть с помощью измерительной базы размером  $2T$  исследуется поверхность, профиль которой описывается функцией  $y(t)$ , где  $t$  – координата вдоль поверхности. Предположим, что измерительная база привязана своими концами к точкам поверхности  $t_H$  и  $t_K$ , тогда в процессе перемещения измерительной базы прибором измеряется модифицированная функция  $Y(t)$ , описываемая соотношением

$$Y(t) = \left[ \frac{y(t_H) + y(t_K)}{2} - y(t) \right] \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол наклона измерительной базы к оси;  $Y(t)$  представляет собой стрелку прогиба функции  $y(t)$  в пределах измерительной базы.

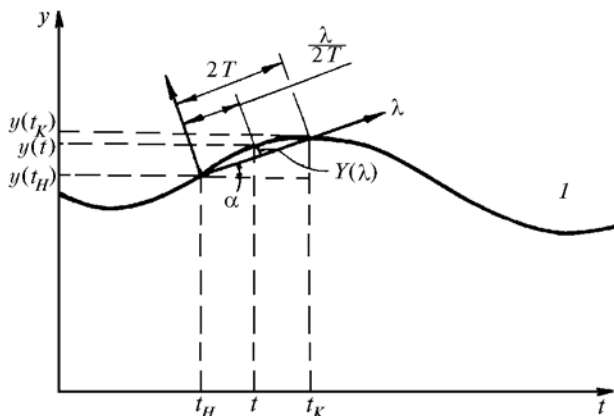


Рис. 2. К выводу соотношения (3);  $I$  – измеряемый профиль

Координаты точек касания поверхности и измерительной базы могут быть записаны в следующем виде:

$$t_H = t - 2T\lambda \cos \alpha, \\ t_K = t + 2T(1 - \lambda) \cos \alpha,$$

где  $\lambda$  – координата точки  $t$  относительно начала измерительной базы, отнесенная к ее длине.

Применяя к функции  $Y(t)$  преобразование Фурье и используя хорошо известные теоремы Фурье-анализа [10], получим

$$F(Y(t)) = F(y(t)) \varphi(\xi), \quad (2)$$

где  $F(y(t))$ ,  $F(Y(t))$  – Фурье-образы функций  $y(t)$  и  $Y(t)$  соответственно;  $\varphi(\xi)$  – функция, описывающая пропускание фильтра пространственных частот,

$$\varphi(\xi) = \left[ \frac{\exp(2\pi i \xi \lambda 2T \cos \alpha) + \exp(-2\pi i \xi (1 - \lambda) 2T \cos \alpha)}{2} - 1 \right] \cos \alpha. \quad (3)$$

Эта функция зависит от параметров измерительной базы. В качестве таковых выступают: относительная координата  $\lambda = (y - y_H)/2T$ , характеристика кривизны поверхности – угол  $\alpha$  и размер измерительной базы  $2T$ . Выполнение (2) доказывает высказанное ранее предположение о фильтрующих свойствах измерительной базы.

Если эти параметры известны, то измеряемая функция  $y(t)$  может быть восстановлена по значениям функции  $Y(t)$  с использованием хорошо известного соотношения [10]:

$$y(t) = Y(t) \otimes F(1/\varphi(\xi)). \quad (4)$$

Ограничения в применении соотношения (4) очевидны:

– функции  $y(t)$  и  $Y(t)$  должны иметь область определения  $(-\infty; \infty)$ , т.е.  $k$  – число стоянок измерительной базы должно быть достаточно большим. Сигналы с конечной областью определения требуют решения задачи об их корректном аналитическом продолжении;

– пространственные частоты  $\xi_H$ , при которых  $\varphi(\xi_H)$  обращается в нуль, необходимо исключить из области определения. Поскольку значения  $\xi_H$  зависят от параметров измерительной базы, то выбор последних должен быть произведен на основании априорной информации. В этих точках спектр мощности сигнала должен быть равен нулю.

Для исследования свойств функции  $\varphi(\xi)$  сделаем следующие предположения:

– контролю подвергается плоская поверхность, т.е.  $\alpha \approx 0$  и  $\cos \alpha \approx 1$ ;

– стрелка прогиба измеряется только в одной точке, лежащей посередине измерительной базы, т.е.  $\lambda = 1/2$ .

В этом случае из (3) имеем комплексную амплитуду

$$\varphi(\xi) = \frac{\exp(2\pi i \xi T) + \exp(-2\pi i \xi T)}{2} - 1 = \cos 2\pi \xi T - 1. \quad (5)$$

Амплитудно-частотная характеристика этого фильтра

$$|\varphi(\xi)|^2 = 1,5 + \frac{1}{2} \cos(4\pi \xi T) - 2 \cos(2\pi \xi T)$$

приведена на рис. 3.

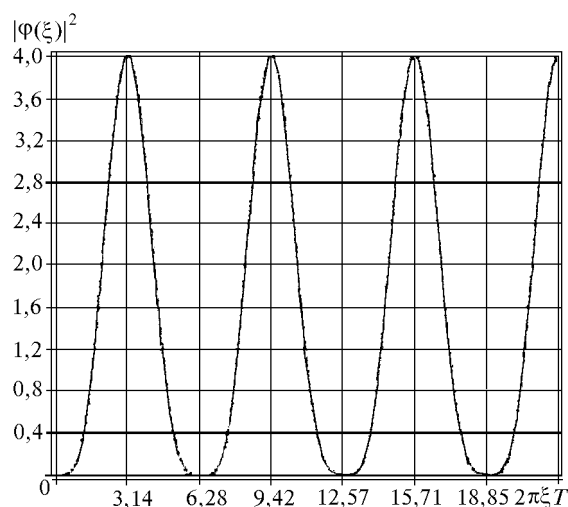


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика фильтра (5)

Для численного моделирования фильтрующих свойств измерительной базы была выбрана гармоническая функция  $y(t) = \cos 2\pi \xi T$ . Результат измерений профиля поверхности функции  $y(t)$  с помощью измерительной базы длиной  $2T$  моделировался с использованием соотношений (1), (2) и (5). Результаты моделирования при различных соотношениях  $\xi$  и  $T$  приведены на рис. 4. Анализ этих графиков показывает достаточную идентичность соотношений (1) и (4) при  $T\xi \neq n$ , где  $n = 0, 1, 2 \dots$ . При  $T\xi \approx n$ , из-за накопления ошибок в процессе вычисления интеграла свёртки, возникают высокочастотные осцилляции функции  $Y(t)$  (рис. 4, з, правый график).

Интересным применением обсуждаемой здесь точки зрения на роль измерительной базы является возможность фильтрации нежелательных пространственных частот. Такая ситуация возникает при контроле формы поверхности, например длинномерных объектов. Длинномерные объекты отличаются от всех прочих тем, что их форма существенно зависит от расстановки опор, на которых этот объект покоится. При смене опор меняется упругая деформация объекта под воздействием силы тяжести. Следовательно, понятие формы поверхности становится неопределенным. Однако такие объекты (например, железнодорожные рельсы) в процессе эксплуатации должны быть установлены на опоры, которые

можно отъюстировать до достижения компенсации этих упругих деформаций, носящих случайный характер. На этом фоне существенную роль будут играть регулярные деформации профиля, обусловленные недостатками технологии. Для преодоления неоднозначности может быть предложена методика измерения профиля поверхности длинномерных объектов, при которой исключительная

роль возлагается на измерительную базу, а именно:

- профиль поверхности длинномерного объекта контролируется с помощью измерительной базы;
- размер измерительной базы должен быть таким, что в ее пределах измеряемый объект можно считать жестким, т.е. стрелка прогиба длинномерного объекта на этой базе не зависит от расстановки опор.

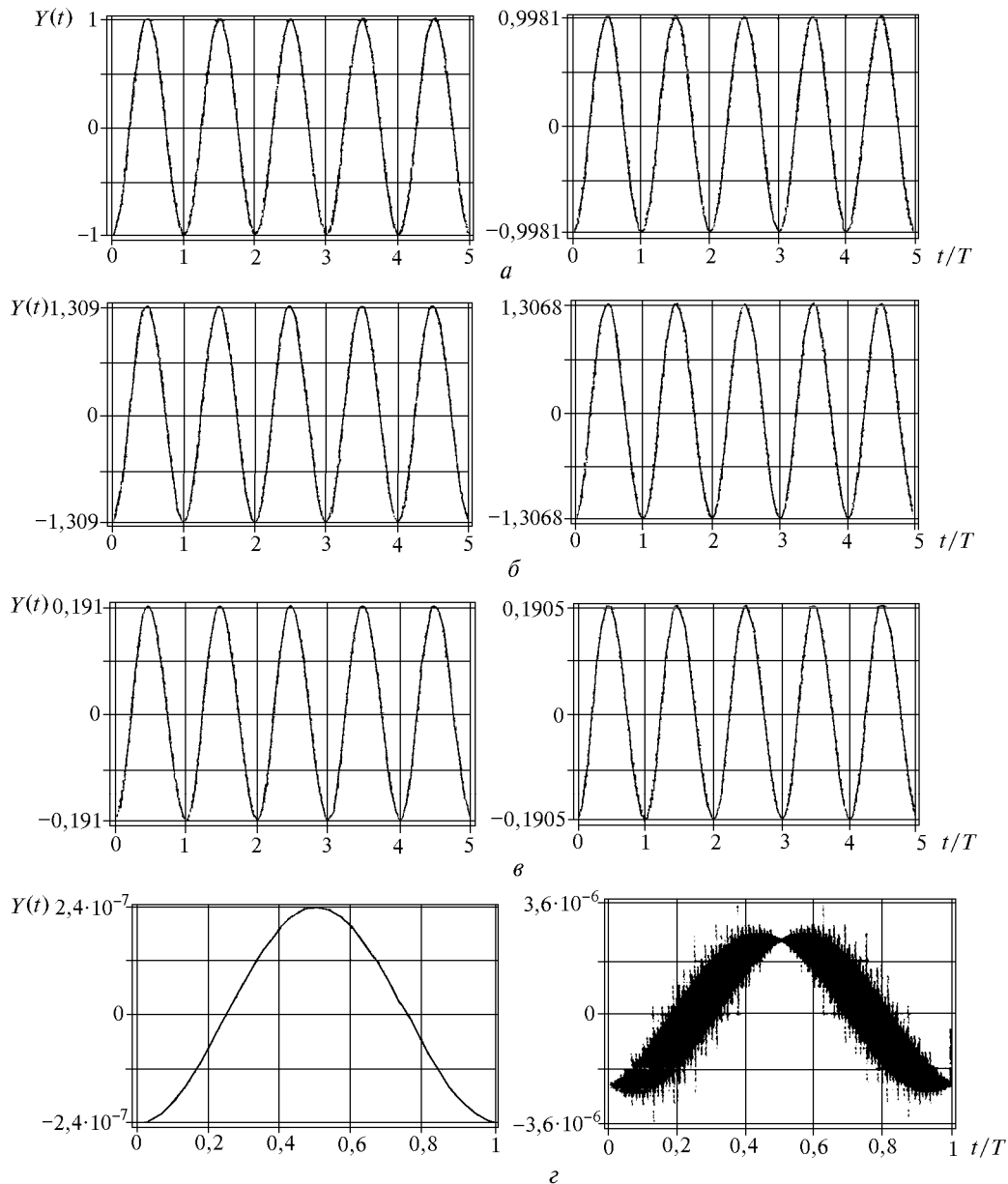


Рис. 4. Результаты численного моделирования процесса измерений гармонического сигнала  $y(x) = \cos 2\pi\xi T$  с помощью измерительной базы  $2T$ : *a* – при  $\xi T = 0,25$ ; *b* – при  $\xi T = 0,3$ ; *v* – при  $\xi T = 0,1$ ; *z* – при  $\xi T = 1,0$ . Слева графики получены из соотношения (1), т.е. прямым моделированием, справа – с использованием соотношения (4) свертки с амплитудно-частотной характеристикой фильтра

Другими словами, измерительная база размером  $2T$  должна осуществлять фильтрацию пространственных частот  $\xi_H$  реального профиля, связанных с нерегулярными деформациями объекта. Полная фильтрация частот  $\xi_H$  означает, что амплитудно-частотная характеристика (см. рис. 3) в точках, где выполняется условие

$\xi_H T = n$ , обращается в нуль. При этом частоты, соответствующие регулярным деформациям  $\xi_P$ , должны этим фильтром пропускаться. Успех измерений определяется разницей между  $\xi_H$  и  $\xi_P$ . Если эта разница существенна, то, приняв  $T = 1/\xi_H$ , можно получить хороший измерительный результат.

В качестве примера приведем результаты, полученные для системы контроля непрямолинейности рельсов в процессе их транспортировки на рольганге. Поскольку ролики рольганга имеют разный износ, то включение опор происходит случайным образом, что приводит к нерегулярным деформациям поверхности катания рельса. Максимальная частота этой деформации  $\xi_H = 1/L$ , где  $L = 0,75$  м – расстояние между роликами рольганга. Таким образом, для эффективной фильтрации этой частоты размер измерительной базы следует выбрать из условия  $\xi_H T = 1$ , следовательно:

$$2T = 2/\xi_H = 1,5.$$

Прибор с такой измерительной базой позволит наиболее эффективно выявлять на профиле пространственную частоту  $\xi_P$ , удовлетворяющую соотношению

$$\xi_P^{0,5} = \frac{0,5}{T} = \frac{0,5}{0,75} = \frac{1}{1,5}.$$

Коэффициент передачи этой частоты  $|\varphi(\xi_P^{0,5})| = 1 - \cos(2\pi \cdot 0,5) = 2$ .

Именно вблизи этой частоты сосредоточен спектр дефектов, обусловленных особенностями технологии. Наиболее интересная частота регулярной составляющей отклонений от прямолинейности с точки зрения технологических причин ее появления

$$\xi_P^{0,23} = \frac{1}{3,2}$$

будет передана измерительной системой с коэффициентом передачи (5)  $|\varphi(\xi_P^{0,23})| = 1 - \cos(2\pi \cdot 0,23) \approx 1$ . Таким образом, эта частота (рис. 4, а) отображается измерительным прибором с базой  $2T = 1,5$  м наиболее адекватно.

Описанная методика была реализована в системе контроля непрямолинейности рельсов в рельсобалочном цехе Кузнецкого металлургического комбината. Эксплуатация и метрологическая экспертиза этой системы показали ее высокую эффективность в выявлении узких мест технологии с точки зрения причин образования «волнистости» рельсов.

1. *Справочник оптика-технолога* / П.Я. Бубис, В.А. Вейденбах, И.И. Духопел и др. / Под общ. ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова Л.: Машиностроение, 1983. 414 с.
2. Губин В.Б. Восстановление деформаций поверхности шара по интерферограммам ее частей // Оптический журнал. 1992. N 9. С. 71.
3. Чунин Б.А., Шишов Е.А. Методы контроля асферических поверхностей // ОМП. 1990. N 11. С. 38.
4. Чунин Б.А., Шишов Е.А. Методы контроля асферических поверхностей // ОМП. 1990. N 11. С. 38.
5. *Testing aspheric surfaces using multiple annular interferograms* Melozzi, Mauro; Pezzati, Luis; Mazzoni, Alessandro // Opt. Eng. 1993. V. 32. N 5. P. 1073–1079.
6. *Применение принципа наложения при экспериментально-расчетной оптимизации крупногабаритных оптических зеркал* / С.В. Любарский и др. // Оптический журнал. 1992. N 7. С. 26.
7. Заборов Я.О. и др. Построение топографии поверхности при контроле отклонений от плоскостности методом интерферометрии наклонного падения с переналожением // ОМП. 1987. N 11. С. 10.
8. *Transformation and connection of subapertures in the multiaperture overlap-scanning technique for large optics test* / Cheng, Wei-Wing; Chen, Ming-Yi. // Opt. Eng. 1993. V. 32. N 8. P. 1947–1950.
9. *Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms* / Otsubo, Masashi; Okada, Katsuyuki; Tsujiuchi, Jumpei // Opt. Eng. 1994. V. 33. N 2. P. 608–613.
10. Кольтер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. с англ. / Под ред. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1973. 687 с.
11. Прэтт У. Цифровая обработка изображения: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 1. 100 с.
12. Половцев И.Г., Шараев А.И. Опыт эксплуатации системы «Опtikон-КПР» в РБЦ КМК // Доклад на Межведомственной рельсовой комиссии. Нижний Тагил, 1996.

*I.G. Polovtsev, S.A. Chudinov. Optical Measurements of Form of Large Aperture Surface by Overlapping Method.*

It is shown in the paper, that when controlling a form of large-aperture surface by the overlapping method, the instrument's measuring base may be presented as a filter of spatial frequencies. The parameters of the function, describing the filter complex amplitude, are determined by the size of the measuring base and the instrument's configuration. The results presented confirm the efficiency of this model applicability in practice.