НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Исследование характеристик репродукционной афокальной оптической системы в устройствах для измерения перемещений объектов

02, февраль 2013 DOI: 10.7463/0213.0531036 Колючкин В. Я., Чан Т. Х. УДК 531.715.2

> Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана vkoluch@bmstu.ru tienhai131@gmail.com

Развитие технологических процессов, в том числе и механообработки, диктует необходимость создания новых высокоточных приборов для оперативного контроля обрабатываемых деталей, а также контроля положения рабочих органов станочного оборудования. Одной из важных задач в механообработке является контроль положения режущего инструмента относительно детали. Имеется ряд особенностей, которые усложняют реализацию процесса контроля. Например, при обработке детали на токарном станке требуется измерять положение резца относительно оси вращения шпинделя при перемещении этого резца вдоль оси в диапазоне, достигающем несколько сотен миллиметров.

Известны устройства для выполнения подобных задач контроля, основанные на интерференционном методе [1]. Наряду с высокой точностью измерения, метод имеет существенные недостатки, в том числе: чувствительность к вибрации, отсутствие возможности прямого определения перемещений исследуемого объекта в связи с необходимостью подсчета количества интерференционных полос при перемещении объекта.

В [2, 3] предложен лазерный прибор для измерения поперечных перемещений объекта при значительных его продольных перемещениях. Принцип действия устройства основан на фазовом методе измерения перемещений транспаранта в виде вращающейся радиальной миры. Изображение транспаранта, подсвеченного лазером, проецируется афокальной оптической системой (ОС) типа Кеплера в пространство предметов, где располагается контролируемый объект. Такой способ проекции обеспечивает постоянный масштаб и изображения транспаранта с синусоидальным законом пропускания. Следует отметить, что погрешность этого прибора в значительной степени определяется вариациями частоты вращения транспаранта. В связи с этим, к механическому приводу, предъявляются очень жёсткие требования по обеспечению стабильности частоты

вращения транспаранта. Сложность реализации такого привода, а также транспаранта с синусоидальным законом пропускания ограничивает возможности применения данного прибора.

В [4] предложен лазерный измеритель поперечных перемещений, свободный от указанного недостатка. Схема этого прибора, представлена на рисунке 1. В состав передающей части прибора входят: полупроводниковый лазер 1 с блоком питания и драйвером, объектив 2, транспарант 3 и афокальная репродукционная ОС 4. В состав приёмной части входят: интерференционный фильтр 5, телевизионная камера 6 с приёмником в виде ПЗС-матрицы и компьютер 7. Объектив 2 формирует параллельный пучок лазерного излучения, который подсвечивает транспарант, расположенный на расстоянии a_1 перед первой компонентой афокальной системы. Выходной зрачок афокальной репродукционной ОС 4, ограничивающий пучки лучей, дифрагирующие на транспаранте, располагается в плоскости, проходящей через совмещённые фокусы первой и второй компонент.



Рис. 1. Функциональная схема прибора 1-полупроводниковый лазер,2-объектив, 3-транспарант, 4-афокальная репродукционная ОС, 5-интерференционный фильтр, 6-телевизионная камера, 7компьютер

На рисунке 2 представлена схема, иллюстрирующая использование этого устройства для контроля положения резца при обработке детали на токарном станке.



Рис. 2. Иллюстрация схемы контроля положения резца на токарном станке

Передающая часть устройства устанавливается неподвижно на станине токарного станка таким образом, чтобы ось лазерного пучка была параллельна оси вращения шпинделя. Приёмная часть крепится на суппорте токарного станка в непосредственной близости от резца. Значения поперечных перемещений резца относительно оси вращения оцениваются перемещениям изображения по транспаранта, регистрируемого телевизионной камерой приёмной части. Алгоритмы обработки сигнала, используемые при измерении положения изображения транспаранта относительно чувствительных элементов матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС), реализуются в ЭВМ. Выбор алгоритма обработки сигналов зависит от распределения энергии в изображении при различных положениях плоскости регистрации вдоль оптической оси передающей системы. Если это распределение остаётся неизменным при смещении изображения вдоль оптической оси, то можно использовать оптимальный алгоритм, обеспечивающий минимальную погрешность измерения. В противном случае следует использовать алгоритмы, для реализации которых не требуется априорной информации о распределении освещённости. К таким алгоритмам относится алгоритм оценки координат изображения по положению «центра масс» или положению «геометрического центра».

Целью исследований, изложенных в настоящей статье, является определение требований к характеристикам репродукционной афокальной системы, при которых возможно использование оптимального алгоритма измерения перемещений изображения. Как следует из представленного выше описания принципа действия устройства, перемещение приёмной части вдоль визирной оси передающей части прибора приводит к расфокусировке изображения, из-за которой возможно изменение распределения энергии в изображении транспаранта.

Чтобы оценить этот эффект в работе с использованием модели когерентной ОС [5] проведён анализ афокальной ОС при следующих условиях:

— функция пропускания транспаранта имеет вид форму квадрата со стороной,

равной *b* и описывается функцией $\tau(x, y) = \operatorname{rect}\left(\frac{x}{b}, \frac{y}{b}\right);$

— длина волны излучения лазера $\lambda = 0,65$ *мкм*;

— выходной зрачок имеет квадратную форму размером $D \times D$;

— коэффициент пропускания $\tau_{np} = 1$ OC.

При подсветке транспаранта плоской волной когерентного изучения с амплитудой *A*₀ распределение комплексной амплитуды поля за транспарантом равно

$$A(x,y) = A_0 rect\left(\frac{x}{b}, \frac{y}{b}\right). \tag{1}$$

Распределение комплексной амплитуды поля в плоскости изображения определяется интегралом свёртки вида

$$A'(x',y') = \frac{1}{\beta} A\left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}\right) \otimes h(x',y'), \tag{2}$$

где h(x', y') - функция рассеяния когерентной ОС;

 $\beta = 1/\Gamma$ – линейное увеличение OC, которое обратно пропорционально угловому увеличению Γ афокальной OC;

⊗ – символическое обозначение интегральной операции свёртки.

Следует отметить, что в зависимости от положения транспаранта относительно первого компонента афокальной OC, характеризуемого величиной a_1 , положение изображения при заданном угловом увеличении Гопределяется величиной a_2 в соответствии с формулой

$$a_{2} = \left(1 + \frac{f_{2}}{f_{1}} + \frac{a_{1}f_{2}}{f_{1}^{'2}}\right)f_{2}^{'} = f_{2}^{'}\left(1 - \frac{1}{\Gamma}\right) + \frac{a_{1}}{\Gamma^{2}},$$
(3)

где f'_1 и f'_2 - фокусные расстояния объектива и окуляра афокальной системы Кеплера.

Известно [4], что функция рассеяния когерентной ОС выражается через функцию зрачка $P_{_{3p}}(\xi',\eta')$ в соответствии с формулой

$$h_{AB}(x,y) = F^{-1}\left\{\tilde{h}(\gamma_{x},\gamma_{y})\right\} = F^{-1}\left\{\left|P_{3P}\left(-\lambda a_{2}\gamma_{x},-\lambda a_{2}\gamma_{y}\right)\right| \exp\left[ik\Delta l\left(-\lambda a_{2}\gamma_{x},-\lambda a_{2}\gamma_{y}\right)\right]\right\}.$$
(4)

В рассматриваемой задаче модуль функции зрачка ОС $|P_{3p}(\xi',\eta')| = \operatorname{rect}\left(\frac{\xi'}{D},\frac{\eta'}{D}\right)$, а

функция волновой аберрации $\Delta l(\xi', \eta')$ характеризует искажения волнового фронта, обусловленные расфокусировкой и другими аберрациями афокальной ОС.

Аналитическая связь аберраций с конструктивными параметрами оптической системы (радиусами кривизны оптических поверхностей, расстояниями между их вершинами, показателями преломления сред и коэффициентами асферических поверхностей) установлена лишь приближенно на основе разложения в ряд, который может быть представлен в виде [6]

$$\Delta l\left(\overline{x}'_{0},\overline{\xi}',\overline{\eta}'\right) = W_{PAC\Phi}\left(\overline{\xi}'^{2} + \overline{\eta}'^{2}\right) + W_{C\Phi EP}\left(\overline{\xi}'^{2} + \overline{\eta}'^{2}\right)^{2} + W_{KOMA}\overline{x}'_{0}\left(\overline{\xi}'^{2} + \overline{\eta}'^{2}\right)\overline{\xi}' + W_{ACTHF}\overline{x}'^{2}_{0}\overline{\xi}'^{2} + W_{KPHB}\overline{x}'^{2}_{0}\left(\overline{\xi}'^{2} + \overline{\eta}'^{2}\right) + W_{ZHCT}\overline{x}'^{3}_{0}\overline{\xi}',$$
(5)

где $(\overline{\xi}' + \overline{\eta}')$ - нормированные координаты выходного зрачка, W_{XXX} - коэффициенты аберрации 3-го порядка.

В нашей задаче проведён анализ влияния расфокусировки и сферической аберрации. Для этого случая выражение для волновой аберрации принимает вид

$$\Delta l\left(\overline{\xi}',\overline{\eta}'\right) = W_{PAC\phi}\left(\overline{\xi}'^{2} + \overline{\eta}'^{2}\right) + W_{C\phi EP}\left(\overline{\xi}'^{2} + \overline{\eta}'^{2}\right)^{2}.$$
(5a)

Рисунок 3 иллюстрирует связь между продольной расфокусировкой и соответствующей волновой аберрацией.



Рис. 3. Определение волновой аберрации ОС при наличии продольной дефокусировки

В [5] показано, что при наличии только расфокусировки функция волновой аберрации Δl определяется выражением

$$\Delta l(\xi',\eta') = \frac{\Delta F}{8p'^2} (\xi'^2 + \eta'^2), \tag{6}$$

где *p*' – расстояние от плоскости выходного зрачка до плоскости изображения.

Сделав в (6) замену переменных $\xi' = \lambda p' \upsilon_x, \eta' = \lambda p' \upsilon_y$, получим выражение функции волновой аберрации как функции пространственных частот, а именно

$$l(\upsilon_x, \upsilon_y) = \frac{\lambda^2 \Delta F}{2} (\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2).$$
⁽⁷⁾

Значения коэффициента $W_{C \phi EP}$ сферической аберрации определяется на основе результатов расчёта при значении нормированных координат на зрачке, равных 1.

Распределение интенсивности в изображении транспаранта можно рассчитать по формуле

$$I'(x',y') = F^{-1}\{\tilde{A}(v_x,v_y)\} \times F^{-1}\{\tilde{A}(v_x,v_y)\}^*,$$
(8)

где

$$\widetilde{A}'(v_x, v_y) = F\{A(x', y')\} = \beta \cdot \widetilde{A}(v_x, v_y) \cdot \widetilde{h}(v_x, v_y),$$

http://technomag.bmstu.ru/doc/531036.html

 $F\{\cdot\}$ и $F^{-1}\{\cdot\}$ - символическое обозначение операторов прямого и обратного преобразования Фурье.

Для численного расчета распределения интенсивности в распределении изображения транспаранта использован алгоритм быстрого преобразования Фурье в программной среде MatLab. При выполнении расчётов приняты следующие исходные данные: амплитуда волны $A_0 = 1$; транспарант (рис. 4), имеющий размер b = 1 мм, удален от первой компоненты афокальной системы на расстоянии $a_1 = -10$ мм; фокусные расстояния компонент афокальной системы равны $f'_1 = 30$ мм и $f'_2 = 50$ мм.



Рис. 4. Распределение интенсивности изображения тест-объекта

На рисунке 5 представлены графики сечений распределения интенсивности в изображении в различных плоскостях пространства изображения (в гауссовой плоскости и при расфокусировках, равных 0,3 м и 0,8 м) при размере выходного зрачка 4×4 мм, а также отсутствии и наличии сферической аберрации, равной одной длине волны 1 λ на краю зрачка.



Рис. 5. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 4 мм (*a*) – *без сферической аберрации;* (*б*) – *со сферической аберрацией W*_{СФЕР} = 1λ

Из этих графиков следует, что на распределение интенсивности влияет как ограничение спектра из-за относительно малых размеров выходного зрачка, так и расфокусировка. Влиянием сферической аберрации по сравнению с расфокусировкой мало. Поэтому дальнейший анализ проводился без учёта этой аберрации.

На рисунке 6 представлены графики сечений распределения интенсивности в изображении в различных плоскостях пространства изображения (в гауссовой плоскости и при расфокусировках, равных 0,3 м и 0,8 м) при размере выходного зрачка 20×20 мм.



Рис. 6. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 20 мм

Из сравнения графиков представленных на рисунках 5 и 6, следует, что увеличение размера выходного зрачка до 20 мм позволяет практически исключить линейные искажения для плоскости Гаусса, но характер распределения интенсивности при наличии расфокусировки практически совпадает со случаем, когда размер выходного зрачка равен 4 мм.

На рисунках 7 и 8 представлены графики сечений распределения интенсивности в изображении в тех же плоскостях пространства изображения, но при размерах выходного зрачка, соответственно равных 0,8×0,8 мм и 0,2×0,2 мм.



Рис. 7. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 0,8 мм



Рис. 8. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 0,2 мм

Из этих графиков следует, что для транспаранта, имеющего прямоугольную функцию пропускания, при размере выходного зрачка 0,2 мм распределение интенсивности весьма не значительно изменяется при расфокусировке, достигающей значения 0,8 м.

На рисунке 9 представлены графики сечений распределения интенсивности в изображении в тех же плоскостях пространства изображения, но при размере выходного зрачка 0,05×0,05 мм. Как следует из этих графиков, интенсивность практически одинакова для всех положений плоскости анализа. По виду кривых можно сделать вывод о том, что при таком малом размере выходного зрачка распределение интенсивности определяется эффектом дифракции.



Рис. 9. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 0,05мм

Был проведён анализ для более сложного случая, когда транспарант представляет собой двумерную решётку, представленную на рисунке 10. Распределение комплексной амплитуды поля за таким транспарантом, подсвеченным плоской волной с амплитудой A_0 описывается формулой

$$A(x, y) = A_0 \operatorname{rect}\left(\frac{x}{b}, \frac{y}{b}\right) \otimes \frac{1}{4b^2} \operatorname{comb}\left(\frac{x}{2b}, \frac{y}{2b}\right) \cdot \operatorname{rect}\left(\frac{x}{Nb}, \frac{y}{Nb}\right),\tag{9}$$

где *b* – размер элементарного элемента решётки.

Рис. 10. Распределение интенсивности изображения тест-объекта в виде растра

Расчеты выполнялись при следующих условиях: амплитуда волны $A_0 = 1$; транспарант, имеющий параметры b = 0,5 мм и N = 3, удален от первой компоненты афокальной системы на расстоянии $a_1 = -10$ мм; фокусные расстояния компонент афокальной системы равны $f'_1 = 30$ мм и $f'_2 = 50$ мм.

На рисунках 11, 12 и 13 представлены графики сечений распределения интенсивности в изображениях, при значениях выходного зрачка, равных 20×20 мм, 0.4×0.4 мм и 0.05×0.05 мм соответственно.

Рис. 11. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 20 мм

Рис. 12. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 0,4 мм

Рис. 13. Распределение интенсивности изображения при размере выходного зрачка 0,05 мм

На основании анализа графиков, представленных на рисунке 12, можно сделать вывод о том, что при размере выходного зрачка, равном 0,4 мм, характер распределения интенсивности в изображении транспаранта в виде решётки почти не изменяется. Так как вид сигнала, регистрируемого в приборе, представленном на рисунке 1, априори известен, то для измерения перемещений объектов, можно использовать оптимальный алгоритм.

Выводы

На основании проведённого анализа модели афокальной системы при когерентном освещении транспаранта показано, что можно подобрать такое сочетание параметров афокальной оптической системы, при котором распределение интенсивности в изображении не зависит от расфокусировки. Этот результат является теоретическим обоснованием возможности использования в приборах для измерения перемещений оптимального алгоритма, обеспечивающего минимальную погрешность оценки значений перемещений объектов.

Список литературы

- 1. Алехин В.Е., Мирошниченко И.П. Лазерный интерферометр для измерения перемещения // Техносфера. 2010. Вып. 2. С. 38-41.
- 2. Васин А.С., Колючкин В.Я., Метелкин А.Н., Мосягин Г.М. Лазерный измеритель линейных перемещений объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1992. № 1. С. 81-87.
- Колючкин В.Я., Мосягин Г.М. Модель телескопической оптической системы при когерентном освещении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1994. № 3. С. 109-116.
- 4. Колючкин В.В. Устройство для измерения поперечных перемещений объектов // Молодежный научно-технический вестник. 2012. № 3. Режим доступа: <u>http://sntbul.bmstu.ru/file/505743.html?__s=1</u> (дата обращения 27.01.2013).
- 5. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
- 6. Voelz D.G. Computational Fourier Optics. A Matlab Tutorial. SPIE Bellingham, Washington, USA, 2011. 232 p.

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Research of duplicating afocal optical system's characteristics in devices designed for measuring objects' movement.

02, February 2013 DOI: 10.7463/0213.0531036 Kolyuchkin V.Ya., Chan T.H.

> Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation vkoluch@bmstu.ru tienhai131@gmail.com

This paper describes the results of investigations which can be used for developing devices for high-accuracy measurement of transverse objects' movement distance to which can vary significantly. In order to tackle this problem one can use the method based on measuring the location of a test optical signal projected onto the surface of the object by an afocal optical system. With the use of a mathematical model of the afocal optical system under the conditions of coherent illumination the influence of its parameters on distribution of intensity in the image with defocusing was analyzed. It was shown that a combination of parameters of the afocal optical system could be selected in such a manner that distribution of intensity in the image doesn't depend on defocusing.

Publications with keywords: travel, laser measuring devices, afocal optical system, intensity distribution

Publications with words: <u>travel</u>, <u>laser measuring devices</u>, <u>afocal optical system</u>, <u>intensity</u> <u>distribution</u>

References

1. Alekhin V.E., Miroshnichenko I.P. Lazernyi interferometr dlia izmereniia peremeshcheniia [Laser interferometer for measuring displacement]. *Tekhnosfera*, 2010, no. 2, pp. 38-41.

2. Vasin A.S., Koliuchkin V.Ia., Metelkin A.N., Mosiagin G.M. Lazernyi izmeritel' lineinykh peremeshchenii ob"ektov [Laser meter of linear displacement of objects]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 1992, no. 1, pp. 81-87.

3. Koliuchkin V.Ia., Mosiagin G.M. Model' teleskopicheskoi opticheskoi sistemy pri kogerentnom osveshchenii [Model telescopic optical system in coherent light]. *Vestnik MGTU*

im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 1994, no. 3, pp. 109-116.

4. Koliuchkin V.V. Ustroistvo dlia izmereniia poperechnykh peremeshchenii ob"ektov [Device for measuring the transverse displacements of objects]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik* [Youth scientific-technical bulletin]. 2012, no. 3. Available at: http://sntbul.bmstu.ru/file/505743.html?_s=1, accessed 27.01.2013.

5. Mosiagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. *Teoriia optiko-elektronnykh system* [The theory of optoelectronic systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 432 p.

6. Voelz D.G. *Computational Fourier Optics. A Matlab Tutorial.* SPIE Bellingham, Washington, USA, 2011. 232 p.