

УДК 535.8(075.8)

Устройство для измерения линейных перемещений объектов

03, март 2012

Колючкин В.В.

*Студент,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Тимашова Л.Н.,
к.т.н., доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
vkoluchkin@yandex.ru

При решении ряда технических задач требуется производить измерение поперечных перемещений объектов, когда сам объект может перемещаться в продольном направлении на значительные расстояния. Одним из приложений является контроль положения режущего инструмента в процессе обработки детали на токарном станке. В этом случае режущий инструмент (резец) перемещается вдоль оси вращения детали на расстояния, достигающие сотен миллиметров. При этом требуется осуществлять контроль положения режущей кромки резца в направлении перпендикулярном оси вращения с погрешностью, не превышающей порядка 1 мкм в диапазоне 0,2 мм.

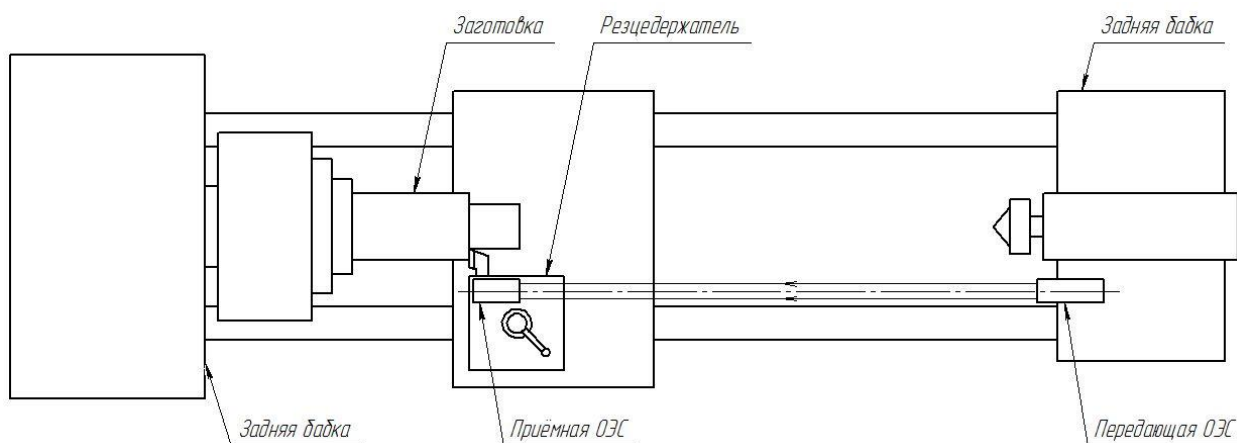


Рис. 1. Функциональная схема

В научной статье [1] предложена схема лазерного измерителя поперечных перемещений объекта, позволяющего проводить указанные измерения при значительных продольных смещениях. Принцип действия измерителя основан на фазовом методе измерения поперечных перемещений изображения тест-объекта, представляющего собой транспарант в виде радиальной миры, вращающейся вокруг оси симметрии. Для обеспечения постоянства масштаба и контраста изображения транспаранта в качестве передающей системы используется проекционная афокальная система типа Кеплера.

Недостатком описанного устройства является наличие механического привода для вращения транспаранта вокруг оси. В этом приборе для обеспечения погрешности измерения перемещений в пределах ± 3 мкм требуется обеспечить постоянство угловой скорости вращения с относительной погрешностью, не превышающей до 0,01%. Кроме этого, относительная погрешность изготовления транспаранта не должна превышать 0,1%.

В данной статье предлагается другая схема, которая свободна от этих недостатков. Функциональная схема предлагаемого устройства представлена на рисунке 2. Устройство состоит из двух частей: передающей системы и приёмной системы. Передающая система включает:

- полупроводниковый лазер 3 с блоком питания 1 и драйвером 2;
- объектив-осветитель 4, формирующий параллельный пучок лучей;
- тест-объект, представляющий собой транспарант 5;
- проекционную телескопическую систему 6.

Приёмная система включает:

- интерференционный фильтр 7;
- проекционную телескопическую систему 8;
- телевизионную камеру с МПИ 9;
- электронный тракт телевизионной камеры;
- ЭВМ 11;
- монитор 12.

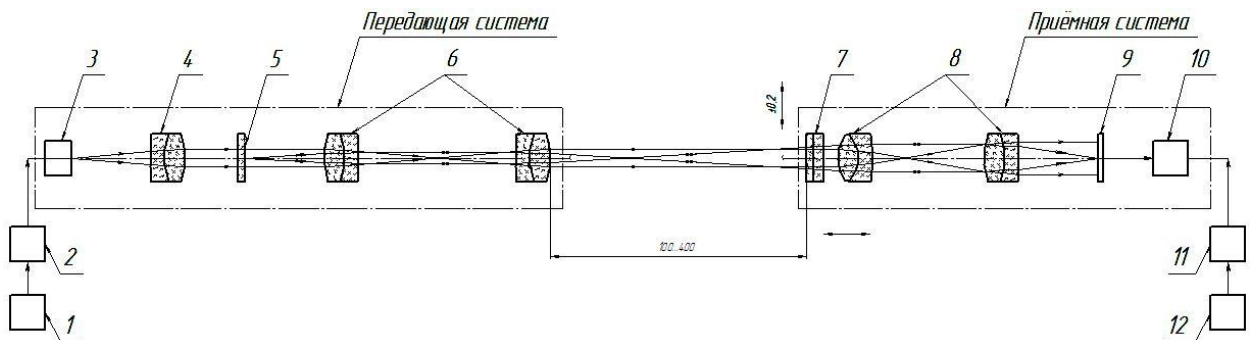


Рис.2. Функциональная схема

В этой схеме, как и в прототипе, используется афокальная проекционная система. Основным отличием данной схемы является использование для измерения перемещений изображения тест-объекта матричного приёмника излучения (МПИ). В качестве тест-объекта принимается перекрестие из двух штрихов с размерами штриха $1 \times 0,5$ мм.

Передающий канал устанавливается неподвижно на станине токарного станка, например, на задней бабке таким образом, чтобы его визирная ось была параллельна оси вращения шпинделя. Приёмный канал жёстко крепится на суппорте токарного станка, перемещаясь вместе с резцом в процессе механической обработки детали. Тогда величину поперечных перемещений резца можно оценивать по значениям перемещения изображения тест-объекта, регистрируемого телевизионной камерой приёмного канала. Алгоритмы, позволяющие измерить положение изображения тест-объекта, реализуются в ЭВМ. Выбор алгоритмов обработки сигналов, который может быть использован для измерения положения изображения в плоскости МПИ телевизионной камеры, зависит от распределения энергии в этом изображении при различных положениях вдоль оптической оси передающей системы. Если это распределение остаётся неизменным при продольном смещении изображения, то можно использовать оптимальный алгоритм, обеспечивающий минимальную погрешность измерения. В противном случае могут быть использованы алгоритмы, которые известны как алгоритм оценки положения «центра масс» или «геометрического центра».

Передающая и приёмная оптические системы образуют репродукционную афокальную систему. Их особенностью является то, что масштаб изображения объекта остаётся неизменным даже при значительных продольных перемещениях. Но при таких перемещениях возникает расфокусировка изображения, которая изменяет распределение энергии в изображении. Чтобы оценить влияние расфокусировки на распределение облучённости в регистрируемом изображении, проведём анализ формирования изображения проекционной телескопической системой 6 (см. рис. 2).

Так как источником излучения является лазер, то оптическая система является линейной по отношению к амплитуде волны. Приняв допущение о пространственной инвариантности, распределение амплитуды волны в плоскости изображения можно описать интегралом свёртки

$$A_1(x', y') = A'(x', y') \otimes h_{аб}(x', y'),$$

где $A'(x', y')$ – распределение амплитуды волны за тест-объектом 5, приведённое с учётом линейного увеличения β к плоскости изображения;

$h_{аб}(x', y')$ – импульсный отклик передающей оптической системы.

Так как формирование сигнала абсолютно одинаково при поперечных смещениях объекта как вдоль оси $o'x'$, так и вдоль оси $o'y'$, то можно рассматривать одномерный случай, например, сечение в плоскости $o'x'$.

Пусть тест-объект, представляющий собой прямоугольник размером a , подсвечивается плоской монохроматической волной с амплитудой A_0 . Тогда распределение амплитуды волны в плоскости изображения без учёта линейных искажений, характеризуемых импульсным откликом $h_{аб}(x)$, равно

$$A'(x) = \frac{A_0}{\beta} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right). \quad (1)$$

Импульсный отклик передающей оптической системы в общем случае имеет вид

$$h_{аб}(x) = \mathcal{F}^{-1}\{|P_{сп}(-\lambda p'v_x)| \cdot \exp[ik\Delta l(-\lambda p'v_x)]\}, \quad (2)$$

где p' – расстояние от плоскости выходного зрачка до плоскости изображения;

$P_{сп}(\xi')$ – абберационная функция зрачка передающей системы;

$\Delta l(\xi')$ – волновая абберация;

λ – длина волны.

Если коэффициент пропускания по зрачку постоянен, то абберационная функция зрачка имеет вид

$$P_{сп}(\xi') = \text{rect}\left(\frac{\xi'}{a_{зп}}\right) \cdot \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\Delta l(\xi')\right], \quad (3)$$

где $\xi' = -\lambda p'v_x$;

$a_{зп}$ – размер выходного зрачка.

Так как в работе исследуется влияние расфокусировки Δf на распределение энергии в изображении тест-объекта, то будем считать отличной от нуля лишь абберацию дефокусировки. Тогда когерентная передаточная функция будет иметь вид [2]

$$\tilde{h}_{аб}(v_x) = \text{rect}\left(\frac{v_x}{v_M}\right) \exp[ikC_{де} \cdot (\lambda p'v_x)^2], \quad (4)$$

где $v_M = \frac{a_{зр}}{\lambda p}$,

$$C_{де} = -\frac{\Delta f}{2f'^2}.$$

Введём константу k_1 , равную

$$k_1 = kC_{де} \cdot (\lambda p')^2 = -\frac{\Delta f}{f'^2} \pi \lambda p'^2. \quad (5)$$

Воспользовавшись теоремой свёртки, пространственное распределение амплитуды оптического сигнала в плоскости изображения передающей системы можно представить выражением

$$A_1(x') = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{aA_0}{\beta} \left[\text{sinc}(\pi a v_x) \cdot \text{rect} \left(\frac{v_x}{v_M} \right) \cdot \exp(ik_1 v_x^2) \right] \right\}. \quad (6)$$

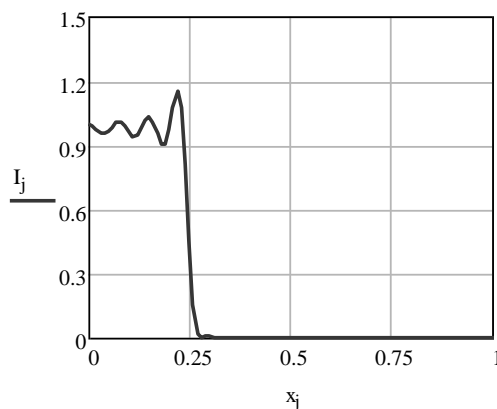
Интенсивность оптического сигнала в плоскости изображения определяется произведением функции $A_1(x')$, описывающей пространственное распределение амплитуды, на комплексно сопряжённую функцию $A_1^*(x')$, а именно

$$I = A_1(x') \cdot A_1^*(x'). \quad (7)$$

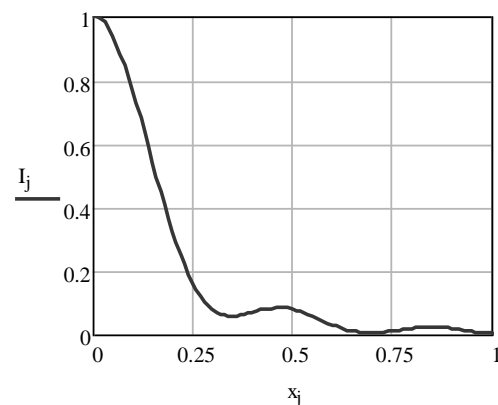
Чтобы оценить влияние дефокусировки на распределение облучённости в плоскости изображения передающей системы были выполнены расчёты интенсивности по формулам (1)...(7) для двух значений размера выходного зрачка, равных $a_{зр} = 0,5$ мм и $a_{зр} = 0,035$ мм, а также следующих остальных значениях параметров передающей системы:

- размер тест-объекта $a = 0,5$ мм;
- линейное увеличение $\beta = 1$;
- компоненты проекционной телескопической системы тонкие, в связи с чем $f' = p'$;
- диапазон дефокусировки от 0 до 400 мм;
- длина волны $\lambda = 0,8$ мкм.

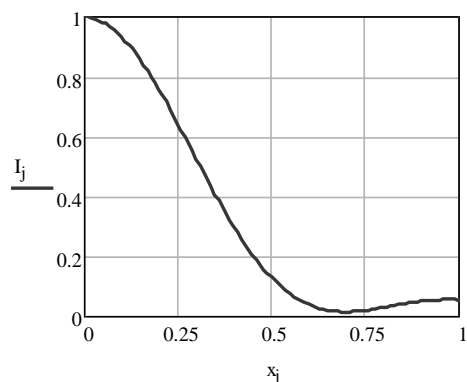
На рисунках 3 и 4 представлены графики нормированного распределения интенсивности для двух указанных значений выходного зрачка и при различных значениях дефокусировки проекционной телескопической системы.



$\Delta f = 0$ мм



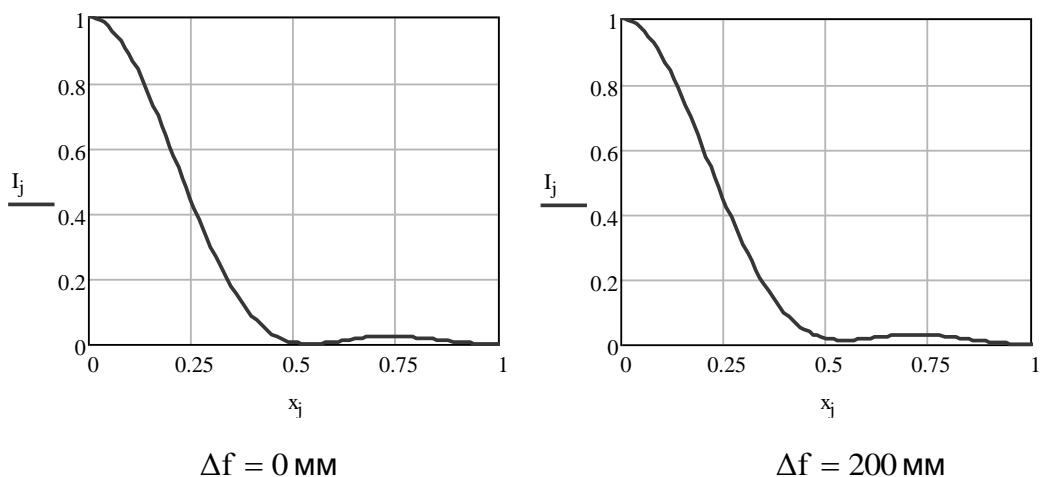
$\Delta f = 200$ мм



$\Delta f = 400$ мм

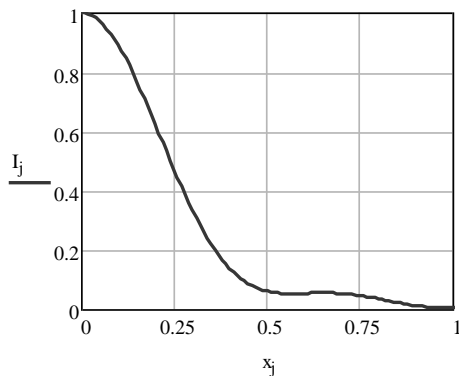
Рис. 3. Графики относительного распределения интенсивности при $a_{зр} = 0,5$ мм и различных значениях дефокусировки Δf

На основе анализа вид графиков, представленных на рисунке 3, можно сделать вывод о том, что при размере выходного зрачка, равном $a_{зр} = 0,5$ мм, пространственное распределение интенсивности сильно зависит от значения дефокусировки. На основании этого можно сделать вывод о том, что относительно большом размере выходного зрачка для измерения перемещений следует использовать алгоритм оценки положения «центра масс» или «геометрического центра».



$\Delta f = 0$ мм

$\Delta f = 200$ мм



$\Delta f = 400$ мм

Рис. 4. Графики относительного распределения интенсивности при $a_{зр} = 0,035$ мм и различных значениях дефокусировки Δf

Как следует из графиков, представленных на рисунке 4, при уменьшении выходного зрачка до значений порядка $a_{\text{зр}} = 0,035$ мм зависимость распределения энергии от дефокусировки существенно уменьшается. Следовательно, при относительно малом размере выходного зрачка для измерения перемещений появляется возможность использования оптимального алгоритма при выбранном способе аппроксимации относительного распределения интенсивности в изображении тест-объекта.

Например, если использовать для аппроксимации функцию Гаусса вида

$$I_n(x') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x'-x_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (8)$$

с параметром аппроксимации σ_0 , то, пренебрегая эффектами пространственной дискретизации, условную дисперсию погрешности оценки максимального правдоподобия положения x_0 колокольного импульса можно определить по формуле [3]

$$D(x_m|x_0) = \frac{2\sigma_0^2}{\mu^2} \cdot \left[1 + \frac{3}{\mu^2}\right], \quad (9)$$

где $\mu^2 = \frac{I^2\sigma_0\sqrt{2\pi}}{\tilde{K}_0}$ - пиковое отношение сигнала к шуму по мощности при значении спектральной плотности мощности шума, равной \tilde{K}_0 .

Если принять значение параметра аппроксимации $\sigma_0 = 0,16$ мм, а пиковое отношение сигнала к шуму равным $\mu = 200$, то среднеквадратическое отклонение погрешности при измерении положения изображения составит величину порядка $\sigma_x \approx 1,1$ мкм.

На основании проведённых исследований можно сделать вывод о том, что предложенная схема устройства позволяет производить измерение поперечных перемещений объектов с погрешностью, составляющей значения порядка одного микрометра, при их значительных продольных смещениях.

Список литературы:

1. Васин А.С., Колючкин В.Я., Метёлкин А.Н., Мосягин Г.М. Лазерный измеритель линейных перемещений объектов. Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 1992. №1. С. 81-87.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, – 1970. - 360 с.
3. Куликов В.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех.– М.: Советское радио, 1978. – 296с.: ил.