

# ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

## ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Р**азвитие технологических процессов диктует необходимость создания промышленных структур, в которых положение объекта при существенных значениях перемещений, скоростей и ускорений определяется с погрешностями, лежащими в субмикронном диапазоне. Это приводит к повышению требований к средствам измерения, входящим в состав такого производственного оборудования.

Вышесказанное требует разработки перспективных высокоточных методов и средств измерения, основу которых составляет лазерная интерферометрия [1].

При создании интерференционных методов и средств измерения перемещений необходимо учитывать ряд существенных особенностей, характерных для большинства технических измерений, например, для контроля отсчетных систем прецизионных станков, лазерных фотопостроителей, координатно-измерительных машин.

Первая особенность состоит в невозможности прямого определения перемещений исследуемой точки объекта. Например, невозможно измерить параметры обрабатываемой на станке детали непосредственно в зоне обработки или перемещение рабочей кромки инструмента при резании [2]. Обычно для этого используются показания отсчетных шкал и лимбов, однозначно характеризующие перемещение отдельных подвижных частей оборудования или инструмента.

Вторая особенность заключается в необходимости высокой точности измерений в широком диапазоне перемещений. Между тем применение метода счета интерференционных полос не всегда целесообразно, так как в этом случае предъявляются достаточно жесткие требования к быстродействию устройств регистрации, что существенно повышает их стоимость, а накопление ошибок в каждом периоде счета может привести к существенным ошибкам измерений [3].

Предлагаемое измерительное устройство позволит расширить функциональные возможности лазерных интерферометров за счет увеличения диапазона контролируемых перемещений без проведения счета интерференционных полос.

Анализ оптических схем большинства лазерных интерферометров перемещений показал, что для измерения длины в них широко используются двухлучевые приборы Майкельсона, в измерительном и опорном плечах которых плоские зеркала могут быть заменены угловыми отражателями (трипель-призмами). В общем виде интенсивность суммарной картины в произвольной точке поля интерференции, образованного двумя световыми волнами, направления распространения которых характеризуются векторами  $k_1$  и  $k_2$ , можно представить в виде:

$$I(r) = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos(r(k_1 - k_2) - (\delta_1 - \delta_2)), \quad (1)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – амплитуды;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – начальные фазы интерферирующих волн.

Измеряемое перемещение  $\Delta X$  связано с фазой входного сигнала фотоприемного устройства, расположенного в заданной точке интерференционной картины, соотношением:

$$\Delta X = \frac{\varphi(r) - \varphi_0}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $\varphi(r)$  – фаза переменной составляющей сигнала фотоприемника;  $\varphi_0$  – начальная фаза интерференции;  $N$  – целое число интервалов  $[0, 2\pi]$  приращений фазы сигнала фотоприемника при перемещении отражателя в интервале  $\Delta X$ ;  $\Delta\varphi$  – изменение фазы в пределах интервала  $[0, 2\pi]$ ;  $\lambda \approx 0,63$  мкм – длина волны гелий-неонового лазера.

Фаза  $\varphi(r)$  связана с мгновенным значением выходного сигнала фотоприемника через функцию  $\arccos \varphi(r)$ , которая однозначно определена только на интервале  $[0, 2\pi]$ . В свя-

зи с этим возникают три локальные задачи: первая – регистрация  $N$ , вторая – регистрация  $\Delta\varphi$ , третья – умножение  $\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right)$  на величину  $\frac{\lambda}{2}$ .

Анализируя выражения (1) и (2), можно сделать вывод, что в существующих интерференционных измерителях перемещений ошибки определения  $N$ ,  $\Delta\varphi$  и текущего значения  $\lambda$  при решении задачи измерения больших перемещений накапливаются и влияют на достигаемую точность.

Сущность разработанного метода и предлагаемого устройства измерения перемещений заключается в том, что для расширения функциональных возможностей за счет увеличения диапазона измеряемых значений перемещений объект размещается после оптической системы, фокусирующей излучение на его поверхность в виде светящейся точки. Элементы же интерферометра (светоделитель, отражатель и фотоприемное устройство) неподвижны друг относительно друга и жестко закреплены на общем основании, снабженном механизмом для их перемещения вдоль оси оптической системы.

Регулировкой расстояния между поверхностью объекта и светоделителем достигается изменение кривизны волнового фронта излучения, падающего на элементы интерферометра, чем за счет изменения чувствительности измерителя обеспечивается увеличение диапазона измеряемых перемещений поверхности объекта [3]. При этом метод счета интерференционных полос не применяется, а все элементы измерителя механически не связаны с контролируемым объектом, что обеспечивает бесконтактный способ измерения перемещений. Результаты теоретического обоснования и численного исследования данного метода подробно изложены в [4].

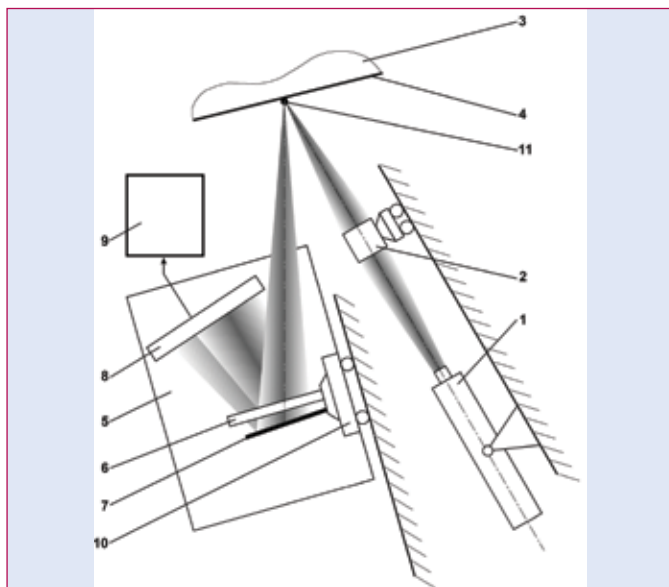


Рис. 1 Схема разработанного измерительного устройства

Схема разработанного измерительного устройства представлена на рис.1. Оптическое устройство для измерения перемещений поверхностей объектов содержит оптически связанные и последовательно размещенные источник когерентного излучения (1), оптическую систему (2), объект (3) с поверхностью (4). На основании (5) жестко закреплены элементы интерферометра: светоделитель (6), отражатель (7), фотоприемное устройство (ПЗС-фотоприемник) (8), информация с которого поступает на устройство регистрации и обработки (9). Основание (5) перемещается механизмом (10) вдоль оси оптической системы (2), чем обеспечивается регулировка чувствительности измерителя в заданных пределах за счет изменения расстояния между поверхностью объекта и светоделителем (дискретность и диапазон механизма (10) зависят от конкретной задачи).

Устройство работает следующим образом. Перед началом испытаний объекта (3), и соответственно, измерений перемещений его поверхности (4) априорно определяется диапазон возможных значений перемещений. Основание (5) с закрепленными на нем элементами интерферометра при помощи механизма (10) размещается на заданном (исходя из поставленной задачи) соответствующем исследуемому диапазону изменения перемещений расстоянии  $R$  от поверхности объекта до светоделивателя. Изменение расстояния между ними приводит к изменению распределения интенсивности интерференционного поля в плоскости фотоприемного устройства (8).

Экспериментальные исследования разработанного устройства проведены для случая измерения квазистатических перемещений поверхности объекта (3), который устанавливался на специальных направляющих и был оборудован микрометрическим винтом и отсчетной шкалой с ценой деления 5 мкм.

Методика эксперимента заключалась в пошаговом задании линейных перемещений объекта в направлении светоделивателя. Регистрация сигнала фотоприемного устройства осуществлялась в цифровом виде на каждом шаге перемещения. Величина перемещения определялась по шкале микрометрического винта. Обработка результатов проводилась с учетом практических сформулированных и экспериментально обоснованных рекомендаций по выполнению измерений [5].

Как уже отмечалось, чувствительность измерителя зависит от величины расстояния от объекта до светоделивателя. Для экспериментального подтверждения были проведены 10 опытов по разработанной методике для 10 начальных значений расстояния  $R$ , задаваемых в диапазоне от 0,17 до 0,62 м с шагом 0,05 м. Каждый опыт состоял из пяти серий измерений. В каждой серии для указанных начальных значений расстояния  $R$  осуществлялись пошагово линейные перемещения

поверхности объекта. Для обеспечения полного изменения интенсивности в анализируемом фрагменте интерференционной картины величина шага и диапазон перемещения задавались в каждом опыте. Исходные данные приведены в таблице. Результаты измерения для каждого опыта усреднялись по пяти сериям.

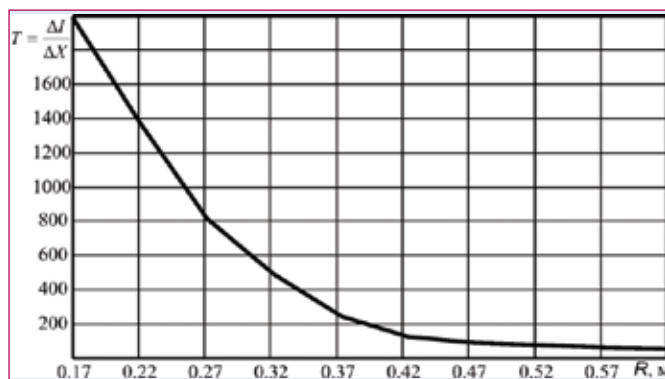
**Таблица 1.** Системные характеристики

№ п/п	Начальное значение расстояния R, м	Диапазон задаваемых перемещений $\Delta X$ , м	Шаг перемещения, $\delta X$ , м
1	0,17	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
2	0,22	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
3	0,27	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
4	0,32	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$
5	0,37	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
6	0,42	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$
7	0,47	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
8	0,52	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
9	0,57	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$
10	0,62	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Для каждого из десяти опытов, соответствующих указанному в таблице начальным значениям расстояния R, определялась чувствительность измерителя как отношение величины изменения интенсивности  $\Delta I$  в заданной области интерференционного поля при переходе со светлой на темную полосу к соответствующему перемещению поверхности объекта измерения  $\Delta X$ .

График, построенный по результатам эксперимента и отражающий зависимость чувствительности измерителя T от начального расстояния R, представлен на рис.2. Так как  $\Delta I$  практически не зависит от начального расстояния R в пределах проводимого эксперимента, основной вклад в изменение чувствительности вносит  $\Delta X$ , которая и определяет диапазон измеряемого перемещения.

Результаты эксперимента (см. рис.2) соответствуют численно полученным данным и отвечают физическим представлениям об интерференционных процессах, происходящих при измерении перемещений, когда используется оптическое излучение со сферическим фронтом волны. Поэтому подобные зависимости чувствительности, определяемые численным и экспериментальным методами, могут быть использованы в качестве градуировочных характеристик T(R) в перспективных интерферометрах для задания диапазонов измеряемых перемещений. Изменением R достигается изменение диапазона измерителя – как величины перемещения объекта, при котором происходит полное изменение интенсивности интерференционного поля (в этих пределах



**Рис.2** Результаты экспериментальных исследований

положение объекта может быть однозначно определено по величине интенсивности, зарегистрированной фотоприемным устройством).

Конкретные значения диапазонов измерителя зависят от цели измерений и особенностей конструктивного исполнения устройства. Для увеличения диапазона измеряемых перемещений R увеличивается, а для уменьшения диапазона – R уменьшается изменением положения основания.

Оптическое устройство для измерения перемещений поверхностей объектов (см. рис.1) работает следующим образом. Оптическая система (2) фокусирует излучение от источника (1) на поверхность объекта (3) в виде светящейся точки (11), которая в свою очередь является точечным источником излучения, расположенным на поверхности объекта. Излучение от точки (11) попадает на светоделитель (6), разделяющий его на два луча: один луч отражается от поверхности светоделителя, а другой – от поверхности отражателя (7). Пространственное совмещение этих лучей происходит в области размещения фотоприемного устройства – в месте наблюдения интерференционной картины. Фотоприемное устройство (8) регистрирует интенсивность оптического поля в заданной области интерференционной картины, а устройство регистрации и обработки (9) определяет перемещение поверхности объекта (3) по результатам измерения интенсивности оптического поля с учетом установленного расстояния R и градуировочной характеристики T(R). Кроме этого в устройстве (9) осуществляется регистрация и обработка результатов измерения перемещений [4, 5].

Таким образом, результатом разработки измерительного устройства является унификация и расширение его функциональных возможностей за счет обеспечения регулировки диапазонов измеряемых перемещений [4].

На разработанное измерительное устройство получен патент Российской Федерации на изобретение [6]. На практике оно было использовано при исследовании процессов дефектообразования в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках в составе экспериментальной установки, на которой получена оценка дефектности образцов после нагружения [7].

Предлагаемое устройство целесообразно применять для обеспечения высокоточных бесконтактных измерений перемещений поверхностей объектов при экспериментальных исследованиях перспективных конструкций, оценке их технического состояния и диагностики, изучении волновых процессов в слоистых конструкциях, в том числе выполненных из анизотропных конструкционных материалов.

Разработанное измерительное устройство экспонировалось на XII Московском международном салоне промышленной собственности "Архимед-2009" и X Юбилейном международном форуме "Высокие технологии XXI века" (2009), где получило одобрение специалистов и было удостоено золотой медали салона и Почетного знака форума – Серебряной статуэтки "Святой Георгий".

Разработка реализована в рамках Приоритетного национального проекта "Образование" и поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 10-08-00136.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирошниченко И.П., Серкин А.Г., Сизов В.П.** Оптические измерительные технологии и их применение для контроля технического состояния конструкционных материалов и изделий. – Нанотехника, 2008, № 4(16), с. 56–59.
2. **Дич Л.З.** Динамическая задача измерения малых параметров движения. – Измерительная техника, 1994, № 9, с. 23–25.
3. **Алехин В.Е., Мирошниченко И.П., Серкин А.Г.** Экспериментальное обоснование интерференционного метода измерения перемещений на основе подсвечивания поверхности объекта контроля. – Измерительная техника, 2008, № 10, с. 26–30.
4. **Алехин В.Е., Мирошниченко И.П., Сизов В.П.** Методы измерения смещений поверхности объектов контроля лазерными интерферометрами. – Дефектоскопия, 2007, № 2, с. 53–61.
5. **Мирошниченко И.П., Серкин А.Г.** Особенности использования интерференционных измерителей малых перемещений при решении задач диагностики технического состояния конструкций. – Дефектоскопия, 2007, № 4, с. 31–39.
6. **Алехин В.Е., Мирошниченко И.П., Серкин А.Г., Сизов В.П.** Оптическое устройство для измерения перемещений поверхностей объектов контроля. Патент РФ № 2343402 от 10.01.09 г.
7. **Мирошниченко И.П., Серкин А.Г., Сизов В.П.** О внедрении интерференционных измерительных технологий в практику исследований перспективных материалов и изделий. – Труды XXII международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», РНД.: ООО ЦВВР, 2008, т. 2, с. 117–122.