

Лазерные устройства восприятия измерительной информации

УДК 531.715.1 : 621.375.826

В. П. КОРОНКЕВИЧ, Г. А. ЛЕНКОВА
(Новосибирск)

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В [1—4] приведены принципы построения и результаты исследования лазерного измерителя перемещений (ИПЛ), разработанного в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР. Прибор состоит из двухлучевого интерферометра с гелий-неоновым лазером, стабилизированным по провалу Лэмба, выходного счетно-вычислительного электронного устройства, шифратора длины волны и цифрового индикатора измеряемого перемещения. Электронно-вычислительное устройство выполнялось в двух вариантах. В первом (ИПЛ-1) был использован итерационный принцип перевода числа интерференционных полос в метрические единицы [4]; во втором (ИПЛ-2) результат измерения разности хода в полосах умножался на произвольный коэффициент (в нашем случае $1/8$ длины волны), набираемый в шифраторе. Цель предлагаемой работы обратить внимание на методы аттестации лазерных интерферометров и некоторые возможности применений этих приборов для прецизионных измерений.

Методы аттестации лазерных интерферометров. При исследовании лазерных интерферометров определение точности показаний производилось взаимным сличением результатов измерения одной и той же длины на партии из пяти приборов, один из которых считался образцовым. В этом случае не требуется вводить поправки на изменение окружающих условий и определять абсолютное значение длины волны излучения лазера. Такой способ контроля можно назвать интегральным, так как определяется суммарная погрешность оптического и электронного блоков. При испытаниях два интерферометра устанавливались навстречу друг другу на жесткой станине. Отражатели монтировались на общем подвижном основании. Визирные оси интерферометров выставлялись по направлению движения стола с точностью $1'$. В шифраторах приборов набиралось одно и то же число, соответствующее длине волны при нормальных атмосферных условиях. Многократные измерения интервалов 10 и 200 мм в прямом и обратном направлении показали, что несовпадение показаний составляет 0,2 мкм (2 импульса). Последний результат можно считать допустимым, так как наименьшая цена деления интерферометров равна 0,1 мкм.

Указанным способом можно производить аттестацию лазерных интерферометров при серийном производстве и сравнивать интерференци-

онные измерительные устройства, построенные на разных принципах. Так, на рис. 1 приведены результаты сравнения показаний интерферометра фирмы «Тейлор Гобсон» (Англия) и прибора ИПЛ-2. В основу прибора МК-1 фирмы «Тейлор Гобсон» заложен итерационный метод построения электронно-вычислительного блока [5]. В нашем приборе используются цифровые интеграторы с последовательным переносом, что позволяет, как указывалось выше, умножать число импульсов фототока от полос на произвольный коэффициент, устанавливаемый в шифраторе. В электронный блок МК-1 введено постоянное значение длины волны лазера для нормальных атмосферных условий. Поправка на изменение условий вводится по таблицам в окончательный результат. На-

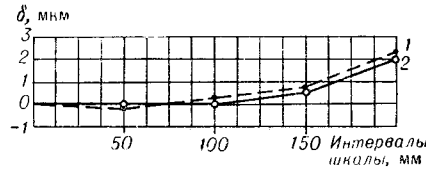


Рис. 1. График погрешности шкалы УИМ по измерениям:
1 — на ИПЛ-2; 2 — на МК-1.

погрешность прибора связана с нестабильностью длины волны лазера, вызванной изменением давления смеси внутри активного элемента. По мере эксплуатации прибора из-за жестчения газа давление внутри трубки падает и длина волны для центра провала Лэмба возрастает. В [6] показано, что за 800 ч работы лазера значение его длины волны изменилось на $4 \cdot 10^{-4}$ нм. Это приводит к погрешности в измерении длины, равной 0,6 мкм на метр, и необходимости переаттестации прибора через каждые три месяца. Для определения интегральной погрешности образцового прибора нами была создана установка [7], которая включала устройство для определения абсолютного значения длины волны лазера путем сравнения с излучением ^{86}Kr . Погрешность прибора в целом определялась по однометровой образцовой штриховой шкале.

Дальнейшее совершенствование технологии изготовления активных элементов лазера в нашей лаборатории позволило получить трубки, срок службы которых превышал 5000 ч. Было установлено [8], что уход длины волны за 5000 ч работы лазера не превышает 7 МГц. При таком изменении частоты погрешность в определении длины на лазерном интерферометре не превысит 0,2 мкм на метр после его эксплуатации в течение трех лет. Таким образом, благодаря применению долгоживущих лазерных трубок отпадает необходимость в частой периодической аттестации образцового прибора.

Другой интегральный способ контроля лазерных интерферометров, особенно пригодный для промышленного производства, можно осуществлять по конечным мерам длины. Экспериментально он был опробован на стандартной измерительной машине типа ИЗМ-2. Концевая мера 2-го разряда вводилась, как обычно, между наконечниками машины. С задней бабкой связывали уголкового отражатель интерферометра. Расхождение показаний интерферометра со свидетельством на меры не превышало предельной погрешности аттестации мер 2-го разряда. Были измерены две концевые меры с номиналом 200 и 300 мм. Для меры 300 мм получено расхождение 0,4 мкм, измеренное значение меры 200 мм точно совпадало с аттестатом.

Определение длин волн источников. Два интерферометра, установленные навстречу друг другу, позволяют сравнивать длины волн источ-

ников излучений. Если электронные вычислительные блоки приборов показывают одно и то же значение длины, то показание шифратора испытуемого прибора соответствует длине волны исследуемого источника. При помощи интерферометра ИПЛ-2 нами было проведено определение длины волны He-Cd лазера, стабилизированного по провалу Лэмба [9]. При сравнении длин волн кадмиевого и гелий-неонового лазеров каретка с отражателями интерферометров перемещалась на длину в 1 м. Полученное значение длины волны He-Cd лазера равнялось $4415,6968 \cdot 10^{-10}$ м. Относительная погрешность измерения составила $3 \cdot 10^{-7}$.

Исследование универсального измерительного микроскопа. Особые возможности лазерные интерферометры представляют для исследования классических оптико-механических приборов. Ниже в качестве примера приведены результаты исследования универсального измерительного микроскопа фирмы «К. Цейсс».

Интерферометр был закреплен на станине микроскопа, а отражатель связан с подвижной кареткой. В силу конструктивных особенностей измерительная ось интерферометра не могла быть расположена в одной плоскости со шкалой микроскопа. Ее смещение в горизонтальной плоскости составляло 70 мм, в вертикальной — 100 мм. При таком нарушении принципа компарирования (принципа Аббе) большое влияние на результаты измерений оказывает непрямолинейность перемещения измерительного стола. Поэтому предварительно погрешность направляющих была изучена отдельно двумя независимыми интерферометрическими методами. В первом со столом связывалось одно из зеркал интерферометра Фабри — Перо. Установка для освещения интерферометра и наблюдения полос равной толщины монтировалась на станине микроскопа. Источником света служил гелий-неоновый лазер. В поле зрения устанавливались четыре полосы. При диаметре зеркала, равном 30 мм, наклон или поворот полос на 0,1 полосы соответствовал наклону или повороту зеркала, а следовательно, стола на 0,2". На рис. 2 приведены результаты измерения непрямолинейности направляющих в горизонтальной (поворот стола) и вертикальной (наклон стола) плоскости для точек шкалы, по которым в дальнейшем проводилось исследование ее погрешности. Результаты представлены в виде ожидаемой погрешности Аббе.

Во втором методе неточность изготовления направляющих контролировалась в белом свете на интерферометре с двойным прохождением лучей [10]. Чувствительность этого метода была в 2 раза выше, чем первого. При диаметре зеркала, равном 35 мм, поворот или наклон на 0,1" вызывал поворот картины полос на 0,1 полосы. Результаты измерений, как среднее из нескольких приемов, нанесены на графики рис. 2. Фактически представленные графики повторяют профиль направляющих универсального микроскопа в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Результаты, полученные двумя методами, в среднем хорошо со-

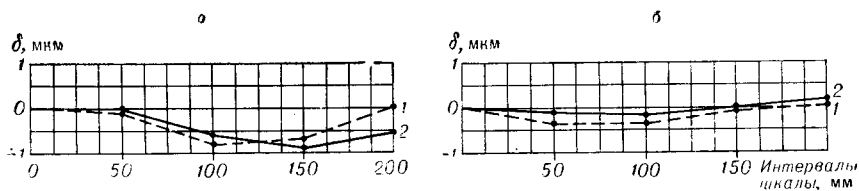


Рис. 2. График погрешности Аббе:

a — в вертикальной плоскости (плечо 100 мм); *b* — в горизонтальной плоскости (плечо 70 мм); 1 — результаты измерений непрямолинейности направляющих УИМ на интерферометре Фабри—Перо; 2 — на двойном интерферометре.

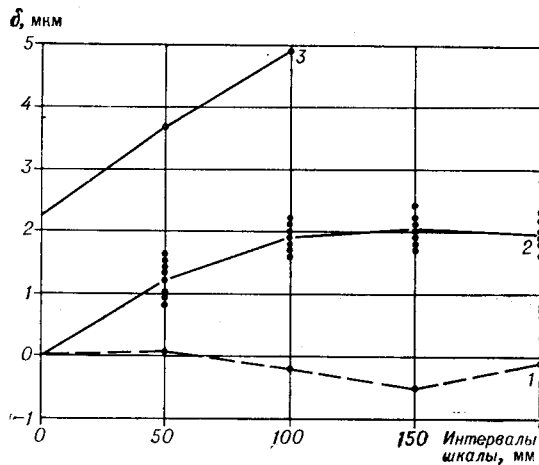


Рис. 3. График погрешности шкалы УИМ: 1 — по аттестату; 2 — по измерениям на ИПЛ-2; 3 — график погрешности метода осевого сечения.

роскопа. По шкале через 50 мм задавались интервалы перемещения стола. За действительное значение длины перемещения принималось показание лазерного интерферометра. Перед началом измерений в шифраторе устанавливался коэффициент пересчета, соответствующий окружающим атмосферным условиям (температуре, давлению и влажности воздуха), определяемый по таблицам [1]. В окончательный результат вводилась поправка на коэффициент линейного расширения шкалы. На рис. 3 даны графики погрешности шкалы по измерениям и данным аттестата. Для каждого исследуемого интервала указаны результаты нескольких приемов измерений, по которым видно, что разброс показаний составляет 0,6—0,8 мкм. Последнее находится в соответствии с измеренной ранее нестабильностью профиля направляющих стола. Расхождение экспериментальных данных с аттестатом составляет 2 мкм. Мы предполагаем, что оно вызвано конструктивными особенностями микроскопа. Аттестация шкалы обычно производится в свободном состоянии, что не соответствует ее рабочему положению. При закреплении шкалы возможна деформация ее поверхности. По этим причинам при измерении на микроскопе не имеет смысла пользоваться аттестатом.

На рис. 3 дополнительно построен график погрешности, рассчитанной по формуле, приведенной в фирменном руководстве для наиболее употребимого метода (метода осевого сечения). Этот график лежит выше экспериментальной кривой. Причем в последней не наблюдается прямой пропорциональности между возрастанием интервала и погрешностью, как следует из формулы. Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что точность микроскопа в действительности значительно выше гарантированной.

Измерение коэффициентов линейного расширения. За время испытаний было проведено большое число циклов измерений длины. На рис. 4 приведены отклонения измеренного значения $l_{изм}$ интервала 200 мм от номинального $l_{ном}$ в зависимости от температуры станины (шкалы) $T_{ст}$. Обработка данных рис. 4 по методу наименьших квадратов дает следующее уравнение:

$$l_{изм} - l_{ном} = -433,3 + 20,6 \cdot T_{ст},$$

где коэффициент 20,6 соответствует удлинению (в мкм) интервала

гласуются. Однако разброс показаний в некоторых точках достигал в горизонтальной плоскости 1,3", в вертикальной — 0,6". Такой большой разброс нельзя объяснить погрешностью методов измерений, так как чувствительность интерферометров равна 0,1—0,2". Вероятно, непрямолинейность движения стола носит нестабильный характер, что может привести к разбросу показаний интерферометра при измерении длины порядка 0,7 мкм.

Дальнейшие измерения были направлены на исследование погрешности микро-

200 мм при изменении температуры станины $T_{ст}$ на 1°C . Следовательно, экспериментально определенный коэффициент линейного расширения шкалы составляют $10,3 \cdot 10^{-6}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$. Последнее значение совпадает с точностью до $1 \cdot 10^{-7}$ с коэффициентом $10,2 \cdot 10^{-6}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$, указанным в аттестате на шкалу. Полученное расхождение лежит в пределах точности измерения на лазерном интерферометре и свидетельствует о высокой надежности исследований погрешности шкалы, о которых сообщалось выше.

На рис. 5 построен график изменения атмосферного давления и отклонения показателя преломления от нормальных условий для 12 приемов измерения в течение месяца. Наглядно иллюстрируется, что показатель преломления изменяется в основном за счет изменения давления. Заметные отступления графиков друг от друга наблюдаются в моменты резкого изменения температуры воздуха. Можно сделать важный практический вывод, что в термостатированном помещении для непрерывного введения поправок на окружающие условия достаточно иметь только датчик давления.

Исследование координатно-расточного станка и координатно-измерительной машины. Исследования проводились в условиях обычного цеха машиностроительного предприятия. На станок устанавливался интерферометр ИПЛ-1, а на подвижный стол — инваровая шкала 2-го разряда. Перемещение стола составляло 600 мм. Показания интерферометра сравнивались с интервалами штриховой шкалы, которая располагалась в одной плоскости с измерительной осью ИПЛ-1. Фиксирование положений штрихов осуществлялось по фотоэлектрическому микроскопу с ценой деления 0,1 мкм. Результаты представлены на графиках рис. 6. Из них видно, что приведенные к нормальным условиям показания лазерного интерферометра хорошо совпадают со значениями интервалов шкалы по аттестату. Расхождения не превышают погрешности аттестации штриховых шкал 2-го разряда.

В реальных условиях эксплуатации координатно-расточных станков и измерительных машин трудно сохранить принцип компарирования из-за различной высоты деталей. В связи с тем, что нельзя изготовить направляющие точнее чем $2-3''$, при аттестации станков и машин образцовая мера устанавливается на среднем уровне, на расстоянии от стола, равном приблизительно 300 мм. При отступлении от линии аттестации может возникнуть погрешность $\pm 1,5$ мкм независимо от измеряемой длины.

Применение лазерного интерферометра в качестве отсчетного устройства позволяет исключить по-

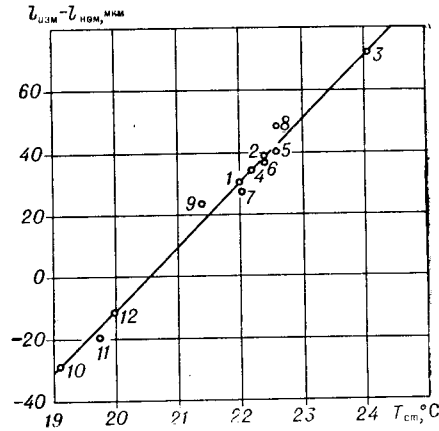


Рис. 4. Температурное изменение интервала 200 мм шкалы УИМ.

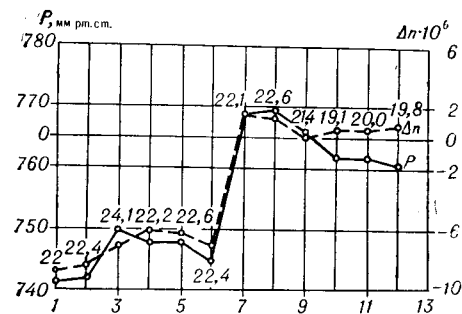


Рис. 5. График изменения давления (P) и отклонения показателя преломления (Δn) от значения, соответствующего нормальным условиям для 12 измерений в течение месяца.

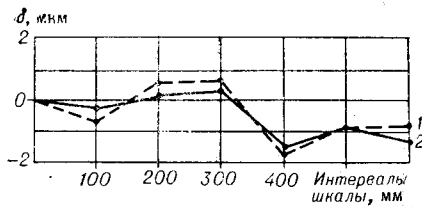


Рис. 6. График погрешности инваровой шкалы 2-го разряда № 175/60: 1 — по аттестату; 2 — по измерениям на ИПЛ-1.

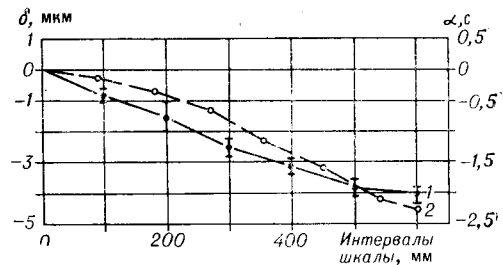


Рис. 7. График погрешности Аббе для координатно-измерительной машины КИМ-600: 1 — по разности показаний двух ИПЛ-2; 2 — по измерениям на автоколлиматоре.

грешность Аббе путем изменения коэффициента шифратора в зависимости от расстояния между измерительной осью интерферометра и высотой детали. Влияние непрямолинейности на результат измерения было оценено экспериментально при исследовании координатно-измерительной машины КИМ-600 при помощи двух лазерных интерферометров ИПЛ-2. Один из интерферометров располагали в плоскости аттестации, другой в плоскости стола. Разность показаний интерферометров (погрешность Аббе) представлена на рис. 7. Полученные данные хорошо согласуются с погрешностью, рассчитанной на основании измерений углов поворота стола при помощи фотоэлектрического автоколлиматора (цена деления $0,1''$).

При определении погрешности Аббе рассмотренным способом не учитывается нестабильный характер непрямолинейности направляющих, который был замечен авторами работы [11] и нами при исследовании универсального микроскопа и измерительной машины (см. рис. 3 и 7). Поэтому в случае особо точных измерений необходимо одновременно с определением длины производить контроль углов поворота стола.

Мы указали только на некоторые возможности применения лазерного интерферометра ИПЛ для точных измерений. В настоящее время на базе этого интерферометра создан прибор для точного измерения параметров вибраций [12] и установки для абсолютного определения ускорения силы тяжести [13]. В стадии исследования находится отсчетно-измерительная система для абсолютного измерения длин субмиллиметрового диапазона и измерительный комплекс для расшифровки астронегативов. Следует ожидать, что круг задач, которые могут быть решены при помощи лазерного интерферометра ИПЛ, будет расширен.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова. Лазерный интерферометр для измерения длины.— *Автометрия*, 1971, № 1.
2. Г. А. Ленкова, А. И. Лохматов, И. А. Михальцова. Одночастотный стабилизированный гелий-неоновый лазер.— *Автометрия*, 1971, № 1.
3. А. И. Лохматов, В. А. Ханов. Система стабилизации газового лазера по провалу Лэмба.— *Автометрия*, 1971, № 1.
4. В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, А. М. Щербаченко. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений.— *Автометрия*, 1971, № 1.
5. B. W. Barringer, A. J. Bonner. A Commercial Laser Interferometer for Length Measurement by Fringe Counting.— *The Radio and Electronic Engineer*, 1970, v. 40, № 1.
6. E. Engelhard. Wellenlängenstabilität eines Neon-Helium Lasers.— *Zeitschrift*

- für angewandte Physik, 1966, v. 20, № 5.
7. Г. А. Ленкова, А. И. Лохматов, В. П. Коронкевич, Э. Б. Колесова, Е. И. Гурин, Г. Г. Тарасов. Лазерный интерферометр для измерения длины.— Измерительная техника, 1971, № 12.
 8. И. А. Михальцова. Частотный сдвиг минимума провала Лэмба в отпаянных гелий-неоновых лазерах.— Автометрия, 1972, № 6.
 9. А. И. Лохматов, П. Я. Белоусов, В. П. Коронкевич. Определение длины волны гелий-кадмиевого лазера для центра провала Лэмба.— Оптика и спектроскопия, 1972, № 1.
 10. Г. А. Ленкова, В. П. Коронкевич. Интерферометры с двойным прохождением лучей.— Оптика и спектроскопия, 1967, т. 23, вып. 2.
 11. Т. Могокита, М. Aihara, К. Fukuoka. Laser Length Measurements with Automatic Compensation for Abbe's Error.— Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., 1970, v. 4, № 4.
 12. В. Г. Витковский, Л. Д. Гик, В. Н. Затолокин, В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, Г. Г. Тарасов. Цифровой лазерный виброизмерительный прибор.— Автометрия, 1970, № 2.
 13. Г. П. Арнаутов, Л. Д. Гик, Е. Н. Камин, В. П. Коронкевич, И. С. Малышев, Ю. Е. Нестерихин, Ю. Ф. Стусь, Г. Г. Тарасов. Высокоточный лазерный гравиметр.— Автометрия, 1972, № 5.

*Поступила в редакцию
31 марта 1972 г.*
