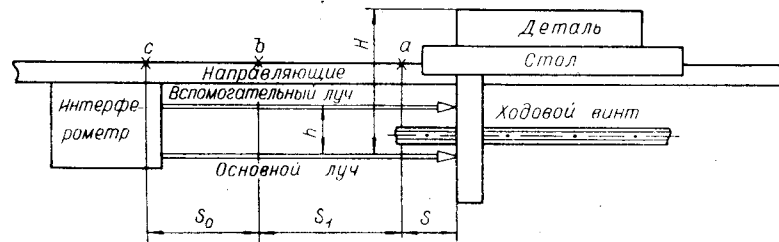


В. М. ВЕДЕРНИКОВ, В. П. КИРЬЯНОВ,  
М. А. КОКШАРОВ, П. М. ЦАПЕНКО  
(Новосибирск)

## КОРРЕКЦИЯ РЕЗУЛЬТАТА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛАЗЕРНЫМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ

Лазерные интерферометры создали предпосылки для повышения точности измерения длин непосредственно в производственных условиях. Однако этому препятствует неустойчивость параметров измерителя.

Рассмотрим пример лазерной отсчетно-измерительной системы станка, упрощенная схема которой приведена на рисунке. Линия измерения находится на высоте  $H$  от оптической оси основного интерферометра.



метра. В системе используется вспомогательный интерферометр, оптическая ось измерительного плеча которого смещена на базовое расстояние  $h$  относительно оси основного интерферометра. Отражатель измерительного плеча основного интерферометра одновременно служит отражателем референтного плеча вспомогательного интерферометра. При угловых поворотах подвижного стола, вызванных непрямолинейностью направляющих или другими причинами, разность хода лучей во вспомогательном интерферометре изменится на  $N_v$  порядков интерференции:

$$N_v = (2h/\lambda) \sin \varphi. \quad (1)$$

Приращение длины на линии измерения составит

$$\Delta N_{\text{изм}} = (2H/\lambda) \sin \varphi = (H/h) N_v = R N_v. \quad (2)$$

Перемещение на линии измерения вычисляется по показаниям счетчиков порядков интерференции основного и вспомогательного интерферометров как

$$S = (N_0 + N_v R) \lambda / 2, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — мгновенное значение длины волны лазера в среде.

При меняющихся параметрах среды даже точное знание текущего значения  $\lambda$  не позволяет точно определить величину  $S$ , используя вы-

\* Chitavat A. K. The key elements metrology with laser interferometers.— Annual Fechn. Conf. Frans. Amer. Soc. Qual. Control, Chicago, March 1967. («Milwankee Wisc.», 1967, p. 467—474).

ражение (3), так как фаза интерференционного сигнала является функцией полной разности хода лучей в среде. Полная разность хода складывается из измеренного расстояния и расстояния от светодельительной пластины интерферометра до начальной точки измерения за вычетом длины референтного плеча. Учет полной разности хода лучей удобно вести с помощью нескольких базовых точек, обозначенных на рисунке  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Точка  $a$  — начальная точка измерения. Точке  $c$  соответствует нулевая разность хода лучей в основном интерферометре. От этой точки начинается отсчет полной разности хода лучей. Ее положение зависит от конструкции интерферометра. Чаще всего точка  $c$  расположена внутри его корпуса, тогда начинать отсчет от нее неудобно. На практике удобнее иметь другую точку  $b$ , отстоящую от  $c$  на некоторую постоянную величину  $S_0$ . Назовем величину  $S_0$  константой интерферометра. Ее значение зависит от конкретного конструктивного исполнения и соответствует «мертвому ходу» измерительной системы станка.

С учетом сделанных обозначений полная разность хода лучей в основном интерферометре складывается из отрезков  $S_0$ ,  $S_1$  и  $S$ . Аналогично для вспомогательного интерферометра полную разность хода лучей обозначим  $S_2$ . Если относительное изменение длины волны излучения в среде составляет  $\Delta\lambda/\lambda_0$ , то истинное значение измеряемого перемещения с учетом поправки на изменение внешних условий будет иметь вид

$$S = (N_0 + N_v R) \lambda_0 / 2 + [(N_0 + N_v R) \lambda_0 / 2 + S_0 + S_1 + S_2 R] \Delta\lambda / \lambda_0. \quad (4)$$

Здесь  $\lambda_0$  — значение длины волны лазера, принятое за опорное.

Определим методику коррекции результата измерения при меняющемся температурном режиме контролируемого объекта. Рассмотрим один из простых случаев, имеющий, однако, важное прикладное значение, — контроль однородных протяженных объектов, таких как измерительные шкалы, линейки и др. Контролируемый объект закреплен одним концом в точке  $a$  (см. рисунок) и имеет возможность свободно расширяться. Изменение температурного режима объекта требует изменения «веса» кванта на величину  $\alpha(t_x - t_0)$ , где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения,  $(t_x - t_0)$  — приращение температуры объекта относительно нормальной температуры. Выражение (4) видоизменится следующим образом:

$$S = \{(N_0 + N_v R) \lambda_0 / 2 + [(N_0 + N_v R) \lambda_0 / 2 + S_0 + S_1 + S_2 R] \Delta\lambda / \lambda_0\} [1 - \alpha(t_x - t_0)]. \quad (5)$$

При измерениях необходимо осуществлять привязку интерферометра к базовым точкам измерительной системы. В этом случае процедура измерения выглядит следующим образом. В начале измерений значение  $S_0$  заносится в память счетно-вычислительного блока. Движение стола начинается из точки  $b$ . В точке  $a$  производится сброс в нуль показаний индикатора, при этом перемещение стола  $S_1$  запоминается и включается температурная коррекция размера детали. Дальнейшее измерение размера  $S$  происходит согласно алгоритму (5). Если возникает необходимость сбросить показания прибора в нуль внутри интервала измеряемого перемещения и начать отсчет относительно некоторой промежуточной базы, то эта база организуется так же, как и в точке  $a$ . Выражение для вычисления перемещения принимает вид

$$S = \{(N_0 + N_v R) \lambda_0 / 2 + [(N_0 + N_v R) \lambda_0 / 2 + S_0 + S_1 + S_2 R] \Delta\lambda / \lambda_0\} [1 - \alpha(t_x - t_0)] - S_3, \quad (6)$$

где  $S_3$  — результат измерения в точке промежуточной базы.

Анализ (6) показывает, что наибольшие доли суммарной погреш-

ности вносят погрешности определения показателя преломления воздуха  $\Delta\lambda/\lambda_0$  и температуры детали. Для уменьшения суммарной погрешности до  $10^{-7}$  необходимо уменьшить погрешность измерения температуры детали до  $0,01^\circ\text{C}$  и снизить погрешность определения  $\Delta\lambda/\lambda_0$  до  $10^{-8}$ , обеспечить точность задания линейных размеров, кроме измеряемых интерферометром, —  $0,1$  мм.

Для устранения влияния вибраций, турбулентности атмосферы в вычислительном блоке нужно предусмотреть режим статистического усреднения, который отличается от основного режима наличием цикла набора интегральной суммы текущих значений результата

$$\bar{S} = \{ (N_0 + N_y R) \lambda_0 / 2 + [ (N_0 + N_y R) \lambda_0 / 2 + S_c + S_1 + S_2 R ] \Delta\lambda / \lambda_0 \} [ 1 - \alpha (t_d - t_0) ] - \bar{S}_3. \quad (7)$$

Лазерный измеритель перемещений является преобразователем накапливающего типа, поэтому случайные сбои в счетчике порядков интерференции могут внести значительную погрешность и свести на нет ценность результата измерения. Кроме применения традиционных методов повышения помехоустойчивости электронной аппаратуры, большую пользу принесло бы немедленное обнаружение сбоев. Ниже предлагается проводить измерения методом возвратно-поступательных шагов. Метод основан на том, что сбой в счетчике приводит к изменению кода на целое число (минимум на единицу) порядков (квантов). Этот сбой легко обнаруживается при повторном измерении того же отрезка, если погрешность прибора на этом отрезке намного меньше порядка интерференции. Рассмотрим для примера случай аттестации миллиметровых штрихов измерительной шкалы на автоматической установке с фотоэлектрическим отсчетом. Алгоритм измерения будет иметь вид

$$A_0 A_1 A_5 A_0 A_2 A_6 A_0 A_7 P_1 \uparrow^9 A_3 \uparrow^5 A_9 P_2 \uparrow^{10} A_5 A_0 A_8 P_1 \uparrow^1 A_1 \uparrow^1 A_{10}.$$

Приведенные операторы имеют следующий смысл:  $A_0$  — определение текущей координаты счетно-вычислительным блоком измерителя перемещений;  $A_1, A_2$  — запись содержимого счетчика порядков интерференции ( $S_c$ ) с точностью до дробной части в регистры памяти РП1 и РП2 соответственно;  $A_3, A_4$  — перепись кода в  $S_c$  из РП1 и РП2 соответственно;  $A_5, A_6$  — движение каретки на шаг вперед (с фотоэлектрической наводкой на штрих) и на шаг назад;  $A_7, A_8$  — вычитание результата  $S_c$  из содержимого РП1 и РП2 соответственно;  $A_9$  — печать содержимого РП2 и подсчет числа измеренных точек;  $A_{10}$  — остановка;  $P_1$  — оператор перехода при равенстве нулю разности  $A_7$  или  $A_8$ ;  $P_2$  — оператор перехода при условии, когда число измеренных точек равно заданному.

Запись  $A_i \uparrow^m$  означает, что после выполнения оператора  $A_i$  будет выполняться оператор с меткой  $m$ ;  $P_j \uparrow^m$  означает, что за оператором  $P_j$  в случае выполнения проверяемого оператором отношения выполняется оператор с меткой  $m$ , в другом случае — следующий в порядке записи оператор.

Выполнение измерений по методу возвратно-поступательных шагов позволяет повысить надежность измерений и резко уменьшить вероятность появления погрешности из-за сбоев в счетчике.

Проведенный анализ показывает, что реализация высоких метрологических возможностей лазерных интерферометров требует достаточно совершенных средств цифровой обработки выходной информации.

Поступила в редакцию  
2 июля 1975 г.;  
окончательный вариант —  
18 сентября 1975 г.