

В. А. ХАНОВ

долговременная погрешность фазового вольтин с помощью двухлучевых интерферометров, является погрешность типа «дрейфа нуля» [1, 2]. Эта погрешность в основном зависит от двух факторов: тепловых деформаций референтного плеча интерферометра и нестабильности нескомпенсированного расстояния в измерительном плече. Если за условный нуль интерферометра принять положение, когда оба оптических пути в плечах равны, то нескомпенсированная длина («мертвый ход») есть оптический путь луча в измерительном плече между фактическим нулем интерферометра (точкой начала отсчета изменений фазы интерференционного сигнала) и условным нулем. Изменения отрезка нескомпенсированной длины зачастую вызываются колебаниями температуры основания, на котором установлен интерферометр, или изменениями показателя преломления воздуха на этом отрезке. Изменения показателя преломления и температуры — процессы медленные. Поэтому погрешность нескомпенсированной длины можно значительно уменьшить периодическим возвращением в точку условного нуля с последующей коррекцией результата. При долговременных измерениях для уменьшения ошибки либо проводят оценку величины нескомпенсированного отрезка и вводят его значение в вычислительное устройство, либо совмещают точку начала отсчета с условным нулем интерферометра [3].

На практике указанные рекомендации в полной мере реализовать не удастся из-за необходимости значительных конструктивных усложнений интерферометра. На наш взгляд, при долговременных измерениях наиболее радикальный путь уменьшения дрейфа нуля интерферометра — исполнение его по дифференциальной схеме.

Ниже мы рассмотрим оптическую схему, особенности конструкции и наиболее характерные применения дифференциального лазерного интерферометра [4]. Его оптическая схема приведена на рис. 1, а. Коллимированный пучок света от источника 1 когерентного излучения, проходя расщепитель 2, делится на два параллельно распространяющихся пучка. В интерферометре 3 светоделитель 4 разделяет каждый из падающих пучков света на два луча. Отраженные от светоделителя 4 лучи направляются к отражателю 5, закрепленному на пьезоэлементе 6. При возбуждении пьезоэлемента низкочастотным сигналом отражатель 5 испытывает периодические смещения $l(t)$ с амплитудой $\geq \lambda/4$. В измерительных плечах лучи распространяются к отражателям 7 и 8. Возвращенные от них лучи пространственно совмещаются на светоделителе 4 с соответствующими лучами, возвращенными отражателем 5, и интерферируют. Образовавшиеся на выходе интерферометра 3 две пары интерференционных полей регистрируются фотоприемниками 9, 9' и 10, 10', электрические сигналы от которых преобразуются формирователями 11 и 12 в две последовательности четных импульсов.

Обработка сигналов фотоприемников в формирователях 11 и 12 осуществляется по схеме интерферометра с низкочастотной фазовой модуляцией [5], позволяющей отсеять низкочастотные шумы в излучении и повысить работоспособность дифференциального интерферометра при значительных колебаниях уровней оптических сигналов. Число импульсов в первой последовательности N_1 пропорционально сумме изменений длины измерительного плеча ΔL_1 и опорного плеча $l(t)$, вызываемого периодическими смещениями отражателя 5:

$$N_1 = k[\Delta L_1 + l(t)],$$

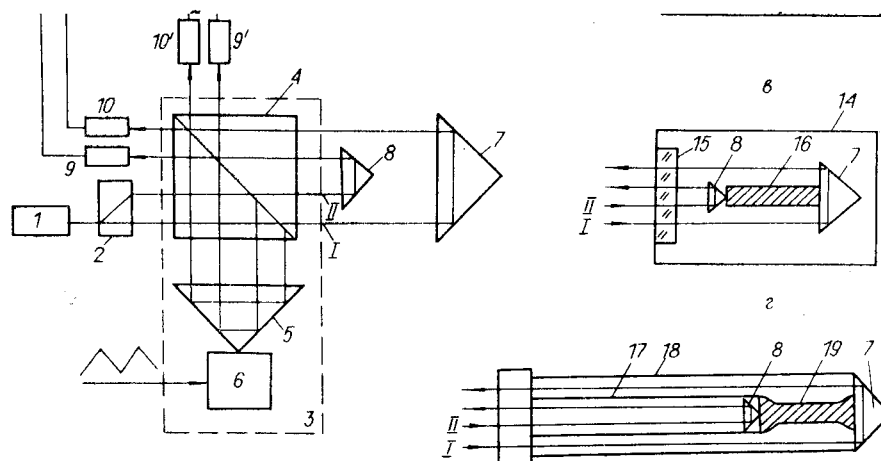


Рис. 1. Оптическая схема дифференциального лазерного интерферометра: а — принцип обработки интерференционного сигнала; б — схема измерений перемещений в труднодоступных местах; в — схема измерений коэффициента теплового расширения материала; г — измерение деформаций образцов материалов

где $k = \lambda/2n$, $n = 1, 2, 3, \dots$ — коэффициент интерполяции, λ — длина волны излучения. Число импульсов во второй последовательности N_2 пропорционально сумме изменений длины измерительного II ΔL_2 и опорного $l(t)$ плеч: $N_2 = k[\Delta L_2 + l(t)]$.

В блоке 13 осуществляется реверсивный счет импульсов этих последовательностей. Причем первая последовательность N_1 направляется на суммирующий вход блока 13, а вторая N_2 — на вычитающий. В результате число импульсов ΔN , зарегистрированное в блоке 13, будет пропорционально разности изменений оптических длин плеч I и II: $\Delta N = N_1 - N_2 = k\Delta$, где $\Delta = \Delta L_1 - \Delta L_2$. Компенсация наведенной модуляции $l(t)$ в рассматриваемой схеме осуществляется за счет дифференциального включения двух интерферометров, имеющих общее опорное плечо с колеблющимся отражателем 5. Аналогичным образом компенсируются любые изменения разности хода измерительных плеч, обусловленные одинаковыми причинами (например, одновременные смещения отражателей 7 и 8 на одну величину и в одном направлении).

Конструктивное исполнение дифференциального интерферометра определяется конкретным его применением. На рис. 1, б показан вариант размещения отражателей интерферометра для измерения перемещений в труднодоступных местах, например в вакуумированном объеме 14. Отражатель 7 закрепляется на подвижном объекте, а отражатель 8 устанавливается неподвижно. Оптическая связь с интерферометром осуществляется через иллюминатор 15. Такое расположение отражателей позволяет исключить прогибы и тепловые деформации иллюминатора и регистрировать только перемещение объекта независимо от расстояния до интерферометра.

Для измерения коэффициентов температурного расширения материалов испытываемый образец 16 с закрепленными на торцах отражателями 7 и 8 устанавливается внутри термостата, имеющего иллюминатор 15 для связи с интерферометром (рис. 1, в).

Исследования деформаций материалов проводятся на испытательных машинах, создающих с помощью штанг 17 и 18 механическое напряжение на образце материала 19 (рис. 1, г). Проведение подобных ис-

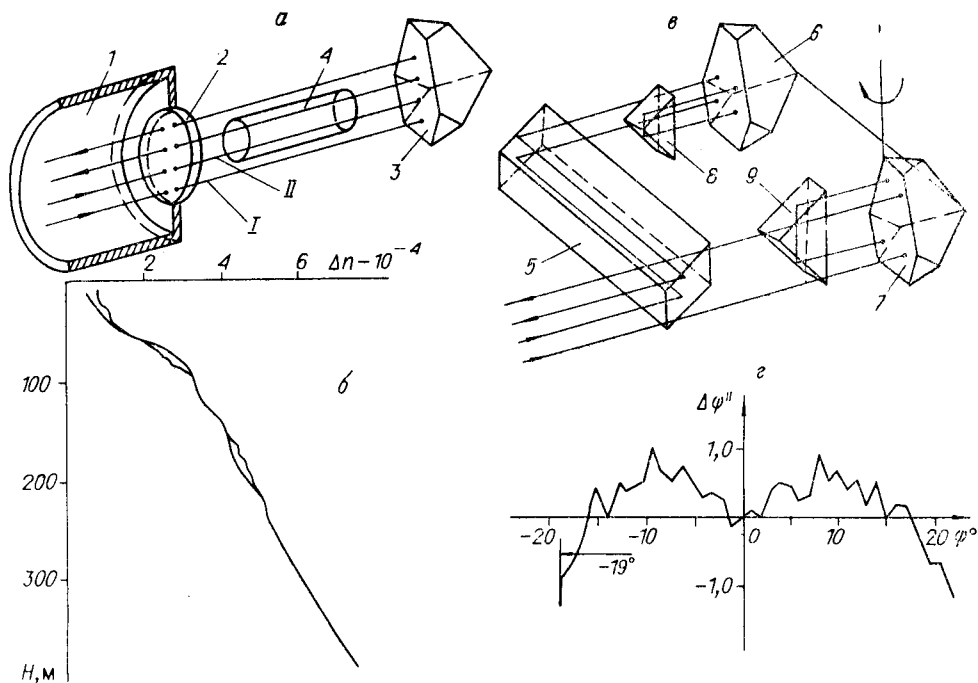


Рис. 2. Результаты исследований дифференциального лазерного интерферометра: а — схема измерений показателя преломления прозрачных сред; б — результаты измерений показателя преломления морской воды; в — схема измерений угловых перемещений; г — зависимость погрешности преобразователя от угла поворота

следований значительно усложняется при одновременном воздействии на образец высокой температуры или радиоактивного излучения. В последнем случае испытание образцов проводится при погружении их в каналы ядерных реакторов на глубину 5—8 м, а испытательную машину, интерферометр и регистрирующее оборудование устанавливают в безопасной зоне. Размещения отражателей 7, 8 непосредственно на торцах образца 19 позволяют скомпенсировать температурные удлинения штанг и значительно повысить точность измерений.

Для регистрации изменений показателя преломления среды (газа, жидкости) оптические элементы дифференциального интерферометра размещаются внутри герметичного зонда 1 (рис. 2, а). Снаружи зонда за иллюминатором 2 закрепляются уголкового отражатель 3 и стеклянный столбик 4. Луч I проходит расстояние между иллюминатором 2 и отражателем 3 по исследуемой среде, а луч II — внутри стеклянного столбика 4. В связи с тем, что измерительные плечи различаются длиной оптического пути, только изменение показателя преломления среды приводит к взаимному смещению интерференционных полос. Схема рис. 2, а обладает такими важными достоинствами, как нечувствительность к дрейфу и смещениям отражателя 3 измерительного плеча, деформациям и изгибам иллюминатора 2.

На основе дифференциального интерферометра в 1980—1982 гг. в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР был разработан автоматизированный зондирующий комплекс, предназначенный для исследования тонкой структуры гидрофизических полей [6]. Комплекс включает погружаемый на кабель-тросе зонд и бортовое вычислительное устройство [7]. Оптическая схема зонда выполнена на основе дифференциального интерферометра с измерительным плечом по схеме рис. 2, а [8]. Длина оптического пути в стеклянном столбике служит базой сравнения, относительно которой регистрируется взаимное смещение интерференционных полос ΔN , обусловленное изменением показателя прелом-

ления морской воды Δn :

$$\Delta n = (\Delta N/l) (\lambda/8),$$

где l — длина столбика.

Вычисление значения Δn по результатам регистрации разности числа импульсов ΔN осуществляется расположенной на судне ЭВМ и регистрируется с помощью цифрового магнитофона и графопостроителя. Дискретность отсчета величины разности хода выбрана $\lambda/8$, что соответствует разрешению $\Delta n = 10^{-6}$ (при длине стеклянного столбика $l = 90$ мм). Применение в зонде дифференциального лазерного интерферометра позволило реализовать следующие технические характеристики комплекса: глубина погружения зонда до 500 м, разрешение при регистрации изменений показателя преломления морской воды $\approx 10^{-6}$, скорость зондирования 0—2 м/с. Зондирующий комплекс прошел натурные испытания на научно-исследовательском судне «Академик Виноградов» (1983 г.) [7]. Применение дифференциального интерферометра обеспечило высокое разрешение по глубине (менее 0,5 м) при скорости движения зонда до 2 м/с. Показания прибора не зависели от условий проведения измерений (качки и дрейфа судна, скорости зондирования). В качестве примера на рис. 2, б приведены изменения показателя преломления морской воды Δn , зарегистрированные с помощью зонда при погружении его на глубину до $H = 400$ м. Измерения проводились с борта дрейфующего судна при волнении 1—2 балла и скорости ветра 2—3 м/с. Время погружения 6 мин. Вертикальный профиль показателя преломления морской воды (изменения Δn) при движении зонда вниз практически совпадает с профилем, зафиксированным при поднятии зонда. Среди других результатов исследований представляют интерес данные экспериментов по изменению Δn на одном горизонте, подтверждающие существование периодических изменений плотности воды (внутренние волны).

Для измерений угловых перемещений объектов в оптическую схему дифференциального интерферометра, приведенную на рис. 1, а, добавляется призма-ромб 5 и отражатели 6—9 (см. рис. 2, в). Отражатели 6 и 7, установленные в каждом плече интерферометра, жестко закрепляются на объекте, угловые перемещения которого необходимо зарегистрировать. Прямоугольные призмы 8 и 9 фиксируются неподвижно. Конструктивно призма-ромб 5 и две прямоугольные призмы 8 и 9 образуют блок неподвижных отражателей. Рассмотренная выше оптическая схема была положена в основу схемы интерференционного преобразователя угловых перемещений [9], предназначенного для применения в стационарной аппаратуре позиционного управления угловыми перемещениями магнитных головок накопителей большой емкости. Преобразователь представляет собой два пространственно совмещенных интерферометра Майкельсона, имеющих общее опорное плечо и два независимых измерительных плеча. Отражатели 6 и 7 измерительных плеч размещены на измеряемом объекте симметрично относительно оси вращения. При повороте объекта отражатели перемещаются в противоположных направлениях и соответственно изменяется оптический путь лучей в измерительных плечах интерферометра.

Изменения разности хода Δ , возникающие при повороте отражателей на угол ψ , в преобразователе регистрируются по изменению числа порядков интерференции ΔN . При прохождении каждой интерференционной полосы формируются четыре счетных импульса. Общее число импульсов ΔN на выходе преобразователя будет пропорционально изменению разности хода Δ : $\Delta N = 4\Delta/\lambda$. С другой стороны, справедливо соотношение $\Delta = 4H \sin \psi$, где H — база блока подвижных отражателей (расстояние между их оптическими центрами). Из этих соотношений следует, что угол поворота ψ может быть рассчитан по формуле

$$\psi = \arcsin(\Delta N/K),$$

где $K = \lambda/16 H$ — базовый коэффициент. В качестве образцового измерительного средства выбиралась оптическая делительная головка RT-5 фирмы „ОРТОН“ (ФРГ). Погрешность головки во всем диапазоне углов поворотов не превышала $\pm 1''$, разрешение — $0,5''$. Блок подвижных отражателей закреплялся на шпинделе головки таким образом, чтобы ось вращения проходила через центр его вращения. Для регистрации выходных сигналов преобразователя применялся десятичный реверсивный счетчик с цифровой индикацией.

Измерение погрешности преобразования угловых перемещений проводилось по следующей методике. Вначале блок отражателей устанавливался в «нулевое» положение, далее блок отражателей поворачивался на известный угол и определялся базовый коэффициент K , и, наконец, измерялись отклонения показаний преобразователя от угла поворота, задаваемого делительной головкой.

Установка нулевого положения блока отражателей осуществлялась по результатам сравнения показаний блока индикации для двух значений угла поворота шпинделя делительной головки: $+15^\circ$ и -15° . При наличии алгебраической разницы показаний ($\Delta_1 - \Delta_2$) блок отражателей устанавливается в новое «нулевое» положение. Показания блока индикации сбрасывались в нуль в этом новом положении, и измерения проводились снова, благодаря чему добивались равенства значений Δ_1 и Δ_2 .

Для определения базового коэффициента K блок отражателей поворачивался на угол 15° , регистрировались показания блока индикации ΔN_0 и вычислялось значение K по формуле $K = \Delta N_0 / \sin 15^\circ$.

Погрешность преобразования угла поворота находили из соотношения $\Delta\psi = [(\arcsin \Delta N / K) - \psi_0]$, где ΔN — показания блока индикации преобразователя; ψ_0 — угол поворота, задаваемый делительной головкой. График погрешности преобразователя $\Delta\psi$ приведен на рис. 2, г. Полученные значения отклонений показаний преобразователя от значения угла, задаваемого делительной головкой, не превышали $\pm 1,0''$, что находится на уровне применяемого образцового средства измерения.

Зарегистрированный диапазон углов $\pm 19^\circ$ определяется апертурой угловых отражателей, установленных на объекте. При замене отражателей на другие, с большей апертурой, диапазон углов поворота может быть расширен до $\pm 45^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коуа Kimura. Measuring on large machines // Technokrat.— 1979.— 12, N 7.— Р. 41.
2. Ханов В. А. Анализ погрешностей измерительных систем с лазерными интерферометрами // Лазерные интерферометры.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1978.
3. Коронкевич В. П., Ханов В. А. Современные лазерные интерферометры.— Новосибирск: Наука, 1986.
4. А. с. 1173177 СССР. Устройство для измерения перемещений объектов и показателей преломления прозрачных сред/В. Д. Прилепских, В. А. Ханов.— Заявл. 03.06.83; Опубл. 15.08.85, Бюл. № 30.
5. Кирьянов В. П., Коронкевич В. П. Лазерный интерферометр с низкочастотной фазовой модуляцией // Квантовая электрон.— 1982.— 9, № 7.
6. Баев С. Г., Ведерников В. М., Долговесов Б. С. и др. Лазерный зондирующий комплекс для океанологических исследований // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. «Оптика лазеров».— М.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1983.
7. Баев С. Г., Ведерников В. М., Кирьянов В. П. Система сбора и обработки данных геофизического лазерного зондирующего комплекса // Автометрия.— 1987.— № 4.
8. Прилепских В. Д., Ханов В. А. Лазерный интерферометр для океанологических исследований/Новосибирск. НИИГАиК.— Новосибирск, 1986.— Деп. в ВИНТИ 12.09.86, № 7398—1386.
9. Дегтярев И. С., Коронкевич В. П., Ханов В. А., Чуринов Е. Г. Интерференционный преобразователь угловых перемещений.— Новосибирск, 1987.— (Препр./СО АН СССР. ИАиЭ; 352).

Поступила в редакцию 10 августа 1988 г.