

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 6

1998

УДК 531.751.1 : 621.317

В. П. Кирьянов, В. П. Коронкевич
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Представлен обзор разработок Объединенного института автоматики и электрометрии (ИАиЭ и КТИ НП) СО РАН в области лазерной интерферометрии, выполненных за последние тридцать лет. За основу анализа взято исследование принципов построения оптико-электронных схем. Прослежена эволюция повышения разрешающей способности создаваемых преобразователей от субмикронметра до субнанометра и техническая основа этого процесса.

Введение. Интерферометры позволяют осуществить измерение размеров путем сравнения их с естественной константой – длиной волны стабилизированного по частоте лазера, излучение которого является весьма близким приближением к идеальной монохроматической волне. Точность измерения длины – этой фундаментальной физической величины – зависит от уровня развития науки и оказывает значительное влияние на прогресс в промышленных технологиях. В современной микроэлектронной промышленности первоначальное становление производства интегральных схем шло на основе технологических средств, обеспечивающих разрешающую способность на уровне единиц микронметров. Освоение субмикронного разрешения позволило выйти на производство больших интегральных схем (БИС). Выпуск современных микропроцессоров и устройств памяти емкостью до десятков Гбайт связан с созданием измерительных систем нано- и субнанометрового диапазона. В этом технологическом прорыве лазерные интерферометры линейных перемещений сыграли важнейшую роль. Как правило, они входили в состав всех литографических установок.

Первые конструкции лазерных интерферометров были созданы в конце шестидесятых годов в результате сведения в единый измерительный прибор лазера, интерферометра и электронных средств регистрации данных. Новое измерительное средство сразу же после своего появления обеспечило на практике уникальные возможности измерения линейных величин с субмикронным разрешением в широких пределах. Последующее развитие лазерной интерферометрии перемещений шло как в сторону увеличения пределов измерений до нескольких десятков метров, так и в сторону повышения разрешающей способности (до долей нанометра).

1. **Лазерные измерители перемещений первого поколения.** Анализ оптических схем большинства лазерных интерферометров перемещений,

появившихся в течение первых десяти лет после создания стабилизированных по частоте гелий-неоновых лазеров, показал, что в практике измерений длины прочно утвердились двухлучевые интерферометры Майкельсона, в измерительном и опорном плечах которых плоские зеркала заменены угловыми отражателями (трипель-призмами). Оптическая схема такого интерферометра, разработанная для первого в СССР действующего образца лазерного измерителя перемещений ИПЛ-1, представлена на рис. 1. В осветительную систему интерферометра входил малогабаритный гелий-неоновый лазер 1, стабилизированный по провалу Лэмба, призмы 2 и 3 для изменения направления распространения излучения и коллиматор 4, уменьшающий расходимость лазерного пучка. Разделяющий блок 6 состоял из двух плоскопараллельных пластин, на поверхность которых были нанесены диэлектрические покрытия. На первой пластине происходило деление пучка, на второй – рекомбинация. Такая схема разделительного блока удобна тем, что после отражения в трипель-призме 11 излучение лазера не попадало в резонатор и не нарушало работу системы стабилизации частоты. Полупрозрачное покрытие рекомбинирующей пластины делило суммарный пучок на две части, которые через соответствующие диафрагмы 7 и 8 попадали на фотокатоды двух фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) 9 и 10. Диафрагмы 7 и 8 были установлены со сдвигом на четверть полосы относительно поля интерференции. Диаметр отверстия диафрагм выбирался много меньшим, чем ширина интерференционной полосы.

Для измерения перемещений интерферометр с лазером устанавливают на неподвижном основании. Призму 11 жестко связывают с объектом. При движении призмы происходит смещение интерференционных полос. Электронные системы измерителя выделяют направление смещения полос и с учетом знака производят подсчет числа интерференционных полос, прошедших перед фотоприемниками 9 и 10.

В общем виде интенсивность суммарной картины в некоторой произвольной точке поля интерференции, образованного двумя световыми волнами, направления распространения которых характеризуются векторами \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , можно представить в виде

$$I(r) = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos[\mathbf{r}(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) - (\delta_1 - \delta_2)], \quad (1)$$

где a_1 и a_2 – амплитуды; δ_1 и δ_2 – начальные фазы интерферирующих волн.

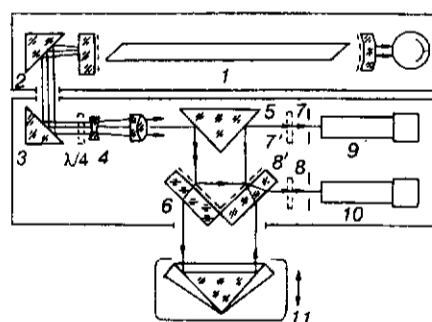


Рис. 1

Фотоприемник, помещенный на пути суммарной волны, преобразует интенсивность выходного сигнала интерферометра в электрический сигнал:

$$U(r) = U_0 + U_m \cos \varphi(r), \quad (2)$$

где U_0 – постоянная составляющая выходного сигнала фотоприемника; U_m – амплитуда; $\varphi(r)$ – фаза переменной составляющей этого сигнала. Измеряемое перемещение ΔX связано с фазой выходного сигнала преобразователя соотношением

$$\varphi(r) = 4\pi \frac{\Delta X}{\lambda} + \varphi_0, \quad (3)$$

где λ – длина волны лазера; φ_0 – начальная фаза интерференции. Из (3) следует, что

$$\Delta X = \frac{\varphi(r) - \varphi_0}{2\pi} \frac{\lambda}{2} = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

где N – целое число интервалов $[0, 2\pi]$ приращений фазы выходного сигнала преобразователя, вызванных перемещением отражателя на интервале ΔX ; $\Delta\varphi$ – смещение фазы в пределах интервала $[0, 2\pi]$. Фаза $\varphi(r)$ связана с мгновенным значением выходного сигнала преобразователя $U(r)$ через функцию $\arccos \varphi(r)$, которая однозначно определена только на интервале $[0, 2\pi]$. В связи с этим возникают три локальные задачи. Первая – регистрация N , вторая – регистрация $\Delta\varphi$ и третья – умножение $\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right)$ на значение $\frac{\lambda}{2}$. Для

решения первой задачи (задолго до появления лазеров) был предложен специальный алгоритм регистрации, получивший название метода двунаправленного (реверсивного) счета полос [1]. Вторая процедура получила название интерполяции дробных долей полосы [2]. Несколько позже был разработан модифицированный алгоритм двунаправленного счета [3], который сравнительно просто позволял регистрировать перемещения с разрешением до одной четвертой полосы (в лазерных интерферометрах это соответствует субмикронному разрешению). Интерферометры, у которых перемещение ΔX вычисляют согласно (4), получили название гомодинных [4].

По мере распространения гомодинных интерферометров стала все более очевидной проблема надежности счета полос. Суть ее состояла в том, что из-за действия различных причин (расходимость пучков, нестабильность мощности) изменяются параметры выходных сигналов, которые нарушают настройку исходных режимов работы электронных схем интерферометров. Поэтому необходимо было обеспечить инвариантность процедуры счета при изменяющихся условиях.

Известно, что для выполнения реверсивного счета необходимо иметь два сигнала U_1 и U_2 , смещенных по фазе на $\pm 90^\circ$. Такие сигналы принято называть квадратурными. В интерферометрических преобразователях требование квадратурности выполняется применительно к переменным составляющим сигналов:

$$U_{01} = U_0 + U_m \sin \varphi, \quad (5)$$

$$U_{02} = U_0 + U_m \sin(\varphi \pm 90^\circ). \quad (6)$$

При наличии только двух квадратурных сигналов корректно решить проблему инвариантности не удастся, так как в (5) и (6) имеются по три неизвестных: U_0 , U_m и φ . Поэтому в гомодинных преобразователях необходимо сформировать как минимум три сигнала. Элементная база того времени не всегда позволяла решать задачу таким образом. Чаще ставилась задача использовать при измерениях минимально возможное число ФЭУ. Для этого были разработаны специальные методы (внутренней фазовой модуляции [5] и оптического гетеродинирования [6]), которые допускали применение всего одного ФЭУ.

Приборы первого поколения были ориентированы на восприятие данных оператором, поэтому результаты измерений выводились на цифровые индикаторы. Именно на стадии вывода результатов измерений возникает потребность умножения $\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right)$ на значение $\frac{\lambda}{2}$. Известно, что текущее

значение длины волны λ зависит от изменений показателя преломления воздуха, в котором распространяется излучение. Поправку на изменения длины волны вводят в процессе выполнения операции умножения, используя дополнительные данные о температуре, давлении и влажности воздуха. В работе не затрагиваются технические аспекты этой проблемы, хотя детально они рассмотрены во многих публикациях сотрудников лаборатории. С целью создания быстродействующих и компактных измерительных средств операция умножения выполнялась с помощью специализированных вычислительных устройств [7, 8], в которых часто применялись числоимпульсные методы выполнения математических операций. Такого вида устройство легло в основу лазерного измерителя перемещений ИПЛ-1 [9, 10]. Основные технические характеристики интерферометра приведены в таблице. ИПЛ-1 долгое время использовался во Владимирском производственно-конструкторском объединении «Техника» для контроля отсчетных систем прецизионных станков. Основным недостатком вычислительного блока ИПЛ-1 был сравнительно ограниченный диапазон допустимых поправок на изменение внешних условий измерений [11].

2. Лазерные измерители перемещений второго поколения. Первым в СССР лазерным интерферометром, счетно-вычислительный блок которого был спроектирован полностью на интегральных микросхемах, был прибор ИПЛ-2 [12, 13]. Оптическая схема интерферометра во многом сохранила признаки предыдущей разработки, но ее характеристики были улучшены за счет введения взамен механически юстируемых диафрагм поляризационных оптических элементов (показаны штрихами на рис. 1) для управления сдвигом фаз в выходных сигналах. Конструкция прибора была адаптирована для встраивания в управляющие системы координатно-расточных станков и координатно-измерительных машин. Модульная конструкция электроники позволяла легко набирать требуемую конфигурацию информационно-измерительных систем. Технические параметры прибора приведены в таблице. На основе ИПЛ-2 были созданы промышленные версии лазерных измерителей ФОУ-1 [14] и ИПЛ-7.

3. Лазерные измерители перемещений третьего поколения. Третье поколение лазерных интерферометрических преобразователей по праву открывает двухчастотный интерферометр 5525А [15], созданный американс-

Технические характеристики лазерно-интерферометрических преобразователей линейных перемещений, созданных в ОИАиЭ СО РАН (1968–1998 гг.)

Модель преобразователя	Пределы измерений, мм	Разрешающая способность по перемещению, мкм	Погрешность измерений, мкм	Диапазон скоростей, м/мин	Допустимое уменьшение сигналов, дБ	Разрешающая способность по скорости, м/мин	Диапазон измерения углов, град	Разрешающая способность при угловых измерениях, угл. с	Длина волны лазера, мкм
ИПЛ-1 (1968 г.)	0–1000	0,08	0,2	0–1,5	4	–	–	–	0,63299140
ИПЛ-2 (1969 г.)	0–1000	0,08	0,2	0–3,6	4	–	–	–	0,63299141
ДИП-2 (1973 г.)	0–60000	0,002 (усред.)	0,1	0–18,0	20	–	–	–	–
ИПЛ-10 (1973 г.)	0–40000	0,01 (усред.)	0,1	0–15,0	20	0,001	20	0,02	0,63299140
«Зенит-2» (1976 г.)	0–1000	0,08	0,2	0–60,0	20	–	–	–	0,63299140
«Зеркало» (1979 г.)	0–10000	0,08	0,1	0–18,0	20	–	–	–	0,63299140
CLWS (1988 г.)	0–1000	0,01	0,1	0–2,0	20	–	–	–	0,63299088
CLWS-300 (1991 г.)	0–1000	0,002	0,1	0–18,0	4	–	–	–	0,63299088
CLWS-300-8 (1998 г.)	0–1000	0,0006	0,05	0–66,0	20	–	–	–	0,63299088
HP5525A (USA) (1970 г.)	0–60000	0,01 (усред.)	0,1	0–18,0	20	0,001	–	–	0,63299137

кой фирмой "Hewlett-Packard". Именно с приборами этого поколения связан технологический прорыв в микроэлектронике. Технические показатели интерферометра 5525A приведены в таблице для оценки уровня созданных в ОИАиЭ СО РАН приборов.

Впервые двухчастотный интерферометр был представлен на выставке в Париже в 1970 году. В этом же году в ИАиЭ начались работы по созданию аналогичного прибора, получившего название ДИП-2 [16]. Функциональная схема лазерно-интерферометрического преобразователя приведена на рис. 2. В его состав входят: лазерная головка 1, интерферометр 2 и подвижный отражатель 3. Лазерная головка 1 состоит из He-Ne-лазера 4, $\lambda/4$ -пластины 5, коллиматора 6, фотоприемников 12 и 14 с анализаторами 15 и 16. Разрядная трубка лазера 4 помещена в аксиальное магнитное поле для получения двухчастотного режима генерации, в основе которого лежит эффект Зеемана. Выходное излучение представлено двумя компонентами, имеющими различные оптические частоты f_1 и f_2 и различные направления вращения

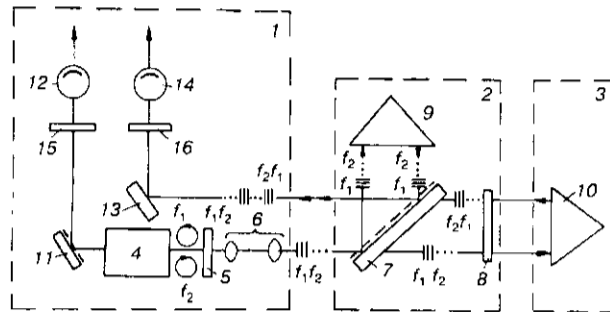


Рис. 2

вектора поляризации. После прохождения $\lambda/4$ -пластины 5 обе компоненты выходного излучения трансформируются из циркулярно поляризованных в линейно поляризованные со взаимно перпендикулярными векторами поляризации.

Интерферометр 2 состоит из светоделительной пластины 7, $\lambda/4$ -пластины 8 и уголкового отражателя референтного плеча интерферометра 9. Светоделительная пластина 7 делит входящее от лазера 4 излучение на две части: одна направляется в референтное плечо, а другая – через $\lambda/4$ -пластину – на отражатель 10 измерительного плеча интерферометра. В измерительном плече излучение лазера дважды проходит через $\lambda/4$ -пластину 8, в результате чего ориентация векторов обеих составляющих меняется на 90° . В точке рекомбинации лучков интерферируют между собой компоненты с разными частотами. Анализатор 16 в лазерной головке 1 выделяет ту или иную пару интерферирующих лучей и пропускает ее на вход измерительного фотоприемника 14. Выходной сигнал фотоприемника 14 можно представить в виде

$$U_{\text{mes}} = k \left\{ U_0 + U_m \cos \left[(\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1) + 2\pi \left(\frac{l_2}{\lambda_2} - \frac{l_1}{\lambda_1} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

На опорный фотоприемник 12 излучение лазера попадает с помощью зеркала 11, пройдя анализатор 15. Выделенные анализатором 15 компоненты интерферируют, создавая опорный сигнал. Из него фотоприемник 12 формирует опорный электрический сигнал вида

$$U_{\text{ref}} = k \left\{ U_0 + U_m \cos \left[(\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1) + 2\pi \left(\frac{l_0}{\lambda_2} - \frac{l_0}{\lambda_1} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

В счетно-вычислительном блоке прибора постоянные составляющие U_0 обоих сигналов отрезаются высокочастотным фильтром и выделяются сигналы, пропорциональные фазам переменных составляющих U_{mes} и U_{ref} :

$$\varphi_{\text{mes}} = (\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1) + 2\pi \left(\frac{l_2}{\lambda_2} - \frac{l_1}{\lambda_1} \right), \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{ref}} = (\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1) + 2\pi \left(\frac{l_0}{\lambda_2} - \frac{l_0}{\lambda_1} \right). \quad (10)$$

При этом разность между измерительным сигналом (φ_{mes}) и опорным (φ_{ref}) пропорциональна текущей оптической разности хода L лучей в интерферометре:

$$\varphi_{\text{mes}} - \varphi_{\text{ref}} = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda_2} - \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda_1}. \quad (11)$$

Так как $\lambda_1 \cong \lambda_2$, то

$$\varphi_{\text{mes}} - \varphi_{\text{ref}} = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda_1} = \frac{2\pi L}{\lambda_1}, \quad (12)$$

откуда

$$L = \frac{\lambda}{2\pi} [\varphi_{\text{mes}} - \varphi_{\text{ref}}]. \quad (13)$$

Для подавления вибраций и повышения разрешающей способности в приборе предусмотрен режим усреднения данных. При этом время выдачи результатов увеличивается с 64 мкс в режиме измерений без усреднения до 16 мс в режиме с усреднением. Характеристики ДИП-2, приведенные в таблице, позволяют отнести его к приборам третьего поколения. Более того, среди известных к тому времени интерферометрических преобразователей и автономных приборов он имел наиболее высокую разрешающую способность. К сожалению, слабым местом в данной разработке оставался двухчастотный лазер. Технологические сложности изготовления лазерных зеркал, работающих непосредственно в газовом разряде и устойчивых к воздействию плазмы и ультрафиолетового излучения, не позволили создать прибор с большим сроком службы, достаточным для практических применений. С выпуском серийного лазера ЛГН-212 эта проблема была решена, но на рубеже 1970–1971 гг. она стояла достаточно остро, что и послужило причиной создания на основе прибора ИПЛ-2 промежуточной модели.

Для обеспечения долговременной стабильности рабочих параметров в новой модели был применен модифицированный метод низкочастотной фазовой модуляции [17, 18]. При использовании принципа фазовой модуляции в интерферометре возбуждаются непрерывные изменения оптической разности хода. Если модуляция осуществляется сигналом вида $L_{\text{мод}} = L_m \times \sin \omega_{\text{мод}} t$, то, согласно (2) и (3), выходной сигнал фотоприемника можно будет представить следующим образом:

$$\begin{aligned} U(t) &= U_0 + U_m \cos \left[2\pi \frac{2(\Delta X + L_m \sin \omega_{\text{мод}} t)}{\lambda} + \varphi_0 \right] = \\ &= U_0 + U_m \left[\cos \left(\frac{4\pi \Delta X}{\lambda} + \varphi_0 \right) \cdot \cos \left(\frac{4\pi L_m}{\lambda} \sin \omega_{\text{мод}} t \right) - \right. \end{aligned}$$

$$-\sin\left(\frac{4\pi\Delta X}{\lambda} + \varphi_0\right) \cdot \sin\left(\frac{4}{\lambda}\pi L_m \sin\omega_{\text{мод}} t\right) \Bigg]. \quad (14)$$

Разложение в ряд Фурье сигнала (14) имеет вид

$$U(t) = U_0 + U_m \left\{ \cos\left(\frac{4\pi\Delta X}{\lambda} + \varphi_0\right) \left[2I_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} L_m\right) + I_2\left(\frac{4\pi}{\lambda} L_m\right) \cos 2\omega_{\text{мод}} t + \dots \right] - \right. \\ \left. - \sin\left(\frac{4\pi\Delta X}{\lambda} + \varphi_0\right) \left[2I_1\left(\frac{4\pi}{\lambda} L_m\right) \sin \omega_{\text{мод}} t + 2I_3\left(\frac{4\pi}{\lambda} L_m\right) \sin 3\omega_{\text{мод}} t + \dots \right] \right\}, \quad (15)$$

где $I_0, I_1, I_2, I_3, \dots$ – функции Бесселя первого рода нулевого, первого, второго и т. д. индексов. В [5] имеют дело с первой и второй гармониками сигнала модуляции. Квадратурные сигналы восстанавливают из огибающих выходных сигналов резонансных усилителей, настроенных на эти гармоники, поэтому частота модуляции $\omega_{\text{мод}}$ должна быть много больше верхней границы спектра информационного сигнала $\omega_{\text{мах}}$, т. е. $\omega_{\text{мод}} \gg \omega_{\text{мах}}$. При использовании простых электромеханических или пьезоэлектрических модуляторов в классическом варианте метода не удавалось достичь удовлетворительных скоростных показателей. Преодолеть эти трудности удалось благодаря применению модифицированного метода внутренней фазовой модуляции [17]. Здесь $\omega_{\text{мод}}$ выбиралась согласно критерию подавления важнейших нестабильностей, обусловленных низкочастотными флуктуациями выходных сигналов интерферометров:

$$\omega_v^* \ll \omega_{\text{ф}} \ll \omega_{\text{мод}}, \quad (16)$$

где ω_v^* – верхняя граничная частота эффективного спектра помех; $\omega_{\text{ф}}$ – частота среза разделительного фильтра, при котором можно обеспечить необходимые условия подавления помехи и пропускания полезного сигнала. Так как $\omega_v^* \leq 20$ Гц, то условие фильтрации помех может быть выполнено, даже если $\omega_{\text{мод}} \ll \omega_{\text{мах}}$, т. е. допустимо, что $\omega_{\text{мод}}$ может быть меньше $\omega_{\text{мах}}$. Следовательно, выбор частоты модуляции может определяться только спектром помех, подлежащих дискриминации, и для широкого круга задач возможно использование дешевых низкочастотных модуляторов. Но при этом возникают две проблемы: первая связана с задачей разделения модулирующего $\omega_{\text{мод}}$ и информационного ω сигналов, вторая – с неискаженной передачей сигнала при любых соотношениях скоростей движения зеркал в измерительном и референтном плечах интерферометра, в том числе при $\omega \approx \omega_{\text{мод}}$.

Первая проблема имеет два решения. Одно состоит в том, что результат измерения передается для регистрации в моменты времени, соответствующие одному и тому же значению фазы модулирующего сигнала $\omega_{\text{мод}}$. Этот подход получил название метода синхронного считывания, или метода стробоскопа [19]. Второе решение более сложное и требует знания дополнительных данных о текущих координатах отражателя, совершающего вынужденные колебания под воздействием сигнала модуляции, для того чтобы иметь возможность вычесть его из информационного сигнала, измеренного

при помощи интерферометра с фазовой модуляцией. Данный подход получил название метода асинхронного считывания, или метода компенсации. Несмотря на более сложную техническую реализацию, в конструкциях, созданных в лаборатории, второе решение получило большее распространение, чем первое.

Проблема неискаженной передачи сигналов при равенстве частот ω и $\omega_{\text{мод}}$ была исследована при модуляции разности хода периодическим сигналом $z(t)$ треугольной формы:

$$z(t) = Z_m [4t/T - (2k+1)] \text{sign} \sin 2\pi t/T, \quad (17)$$

где Z_m – амплитуда модулирующего сигнала; $T = 2\pi/\omega_{\text{мод}}$ – период модуляции; $k = 0, 1, 2, \dots$ – число полуволн сигнала модуляции; $\text{sign} F$ – функция, определяющая знак выражения F . (Точнее следовало бы сказать, что здесь мы имеем дело с фазовой манипуляцией [20].) Индекс фазовой модуляции $\Theta_m = 4\pi \frac{Z_m}{\lambda}$ целесообразно устанавливать так, чтобы избежать амплитудной

модуляции выходного сигнала интерферометра, например, равным π радиан. Выходной сигнал интерферометра будет выглядеть следующим образом:

$$u_1(t) = U_m \cos \{ 4\pi \delta(t)/\lambda + \Theta_m [4t/T - (2k+1)] \text{sign} \sin 2\pi t/T \}, \quad (18)$$

где $\delta(t)$ – измеряемая разность хода лучей. Амплитуда гармоник сигнала вида (18) может быть определена из выражения [21]:

$$C_m = \frac{1}{4} \left[\frac{\sin \pi/2(\omega/2 + \lambda/2Z_m - m)}{\pi/2(\omega/\omega_{\text{мод}} + \lambda/2Z_m - m)} \frac{\sin \pi/2(\omega/\omega_{\text{мод}} + \lambda/2Z_m + m)}{\pi/2(\omega/\omega_{\text{мод}} + \lambda/2Z_m + m)} + \frac{\sin \pi/4(\omega/\omega_{\text{мод}} - \lambda/2Z_m - m)}{\pi/4(\omega/\omega_{\text{мод}} - \lambda/2Z_m - m)} \cos \frac{\pi}{4} \left(\frac{3\omega}{\omega_{\text{мод}}} + \frac{\lambda}{2Z_m} - 3m \right) + \frac{\sin \pi/4(\omega/\omega_{\text{мод}} - \lambda/2Z_m + m)}{\pi/4(\omega/\omega_{\text{мод}} - \lambda/2Z_m + m)} \cos \frac{\pi}{4} \left(\frac{3\omega}{\omega_{\text{мод}}} + \frac{\lambda}{2Z_m} + 3m \right) \right]. \quad (19)$$

Здесь m – порядковый номер гармоники; $\omega = 4\pi \delta'(t)/\lambda$.

В зависимости от скорости $\delta'(t)$ изменения оптической разности хода лучей в интерферометре спектр сигнала (18) претерпевает значительные изменения, особенно в самой низкочастотной части. Из анализа спектра сигнала (19) следует, что в областях, где $\delta'(t)$ и $z'(t)$ близки по модулю, значителен вклад гармоники C_0 . Его величина зависит от выбранного значения индекса модуляции и соотношения скоростей $\delta'(t)$ и $z'(t)$. Это обстоятельство определило выбор технической реализации процедуры фильтрации составляющей U_0 . Отсутствие C_0 в информационном сигнале дает искажение, известное в радиотехнике как «сползание пьедестала» сигнала [22]. Данное явление может привести к потере полезной информации. Для устранения подобного рода ошибок используется операция восстановления постоянной составляющей сигнала с помощью двухсторонних фиксаторов уровня [23], которые позволили надежно решить проблему регистрации моментов перехода сигнала через нулевую линию при значительной (в 10 раз и больше) девиации амплитуды сигнала.

Преобразователи с низкочастотной фазовой модуляцией применялись при выполнении исследовательских и прикладных работ в течение 25 лет. Первой действующей моделью интерферометра с низкочастотной фазовой модуляцией стала модернизированная схема прибора ИПЛ-2, в котором была реализована идея синхронного считывания. Но становление данного направления связано с созданием лазерного измерителя перемещений ИПЛ-10 [19]. Этот прибор представлял собой многофункциональное измерительное устройство, позволяющее производить высокоточные измерения длин, скоростей движения, угловых поворотов, усреднять результаты измерений, вводить поправки на непрямолинейность перемещения объекта, если оптическая ось интерферометра не совпадает с плоскостью перемещения объекта.

Фазовая модуляция выходных сигналов интерферометров осуществляется за счет периодических изменений оптической разности хода с помощью пьезоэлектрического модулятора и соединенного с ним референтного отражателя. Оптико-механический блок прибора ИПЛ-10 состоит из трех интерферометров с общим плечом, содержащим фазовый модулятор на основе афокальной системы типа «кошачий глаз». Оптическая схема блока приведена на рис. 3. Излучение лазера 1 поступает в интерферометр через поворотные призмы 2 и коллиматор 3. Поворотная призма 4 направляет излучение на главную светоделительную пластину 5 интерферометра. Поверхность пластины 5, обращенная к падающему пучку, покрыта диэлектрическим слоем, обеспечивающим равное отражение и пропускание света, поляризованного в плоскости, перпендикулярной плоскости падения луча. Отраженная часть луча направляется к афокальному отражателю 7. Его зеркало закреплено на пьезоэлементе 16 и совершает вынужденные возвратно-

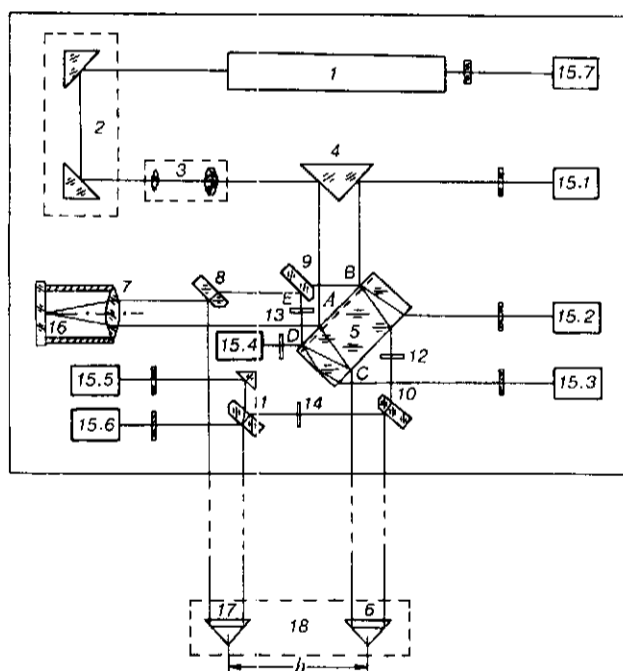


Рис. 3

поступательные движения. После отражения луч проходит пластины 8 и 9 и попадает на пластину 5 (в точку *B*). Часть пучка, прошедшая через пластину 5, отражается уголковым отражателем 6 и возвращается, пройдя пластину 10, в точку *B* пластины 5. В точке *B* суммарный пучок делится на две части. Одна попадает на вторую грань призмы 4 и направляется в фотоприемник 15.1. Другая часть отражается в точке *B*, проходит через пластину 5 и попадает на фотоприемник 15.2. Для выявления направления изменения сигналов в один из лучей вводится фазовая пластина 12, а перед фотоприемниками устанавливаются поляризаторы. Рассмотренные элементы образуют «основной» интерферометр, предназначенный для измерения линейных перемещений объекта 18.

Для подавления фазовой модуляции и компенсации температурных дрейфов референтного плеча используется второй интерферометр – «опорный». Референтное плечо этого интерферометра целиком расположено в толще пластины 5 и формируется за счет частичного отражения света в точке *C*, лежащей на второй, не покрытой диэлектриком поверхности пластины 5. Измерительное плечо этого интерферометра образуется путем частичного отражения в точку *D* света, возвращенного афокальной системой. В точке *D* суммарный пучок делится на две части. Одна отражается и поступает на фотоприемник 15.4, другая после полного внутреннего отражения от боковой поверхности пластины 5 попадает на фотоприемник 15.3. Фазовая пластина 13 устанавливается в измерительном плече «опорного» интерферометра. Наличие «опорного» интерферометра позволяет эффективно реализовать интерполяцию дробных долей и на порядок повысить разрешающую способность.

Третий интерферометр, применяемый для измерения угловых разворотов объекта 18, образован с помощью пластин 8, 10 и 11. Светоделительная пластина 8 установлена на пути пучка света, возвращенного афокальной системой. Отраженная пластиной 8 часть пучка света направляется на уголкового отражателя 17, который возвращает ее на рекомбинирующую пластину 11. Светоделительная пластина 10 установлена на пути луча, идущего от отражателя 6. Часть света, отраженная пластиной 10, направляется к рекомбинирующей пластине 11. Здесь суммарный пучок делится на две части: одна приходит на фотоприемник 15.5, другая – на 15.6. Фазовая пластина 14 установлена между пластинами 10 и 11. Отражатели 6 и 17 жестко закреплены на подвижном объекте 18. Расстояние между вершинами уголкового отражателей *h* выбрано равным 100 мм. При данной базе и разрешении обоих интерферометров, равном $\lambda/8$, разрешающая способность к угловым перемещениям равна $0,2''$. Технические характеристики прибора ИПЛ-10 приведены в таблице.

Одной из наиболее интересных работ, выполненных с помощью ИПЛ-10, была работа по контролю отсчетных систем уникального станка НС-33Ф2 на новосибирском заводе «Тяжстанкогидропресс» [24], во время которой были определены погрешности отсчетных систем станка, проконтролирована стабильность положения портала в пространстве при его движении в диапазоне 15 м, точность стыковки систем статического и динамического выравнивания портала. Упрощенный вариант прибора под шифром ИПЛ-20 был изготовлен для сборки отсчетных систем станков, выпускаемых заводом. С помощью этого прибора были проконтролированы десятки уникальных тяжелых станков, в том числе с ходом портала до 45 м.

Первой модульной конструкцией преобразователя перемещений стала модель интерферометра, созданная для фотограмметрического автомата «Зенит-2» [25]. Своеобразной особенностью этой модели явилось размещение предварительных каскадов электронного тракта преобразователя (фотодиодов и преобразователей ток-напряжение) внутри корпуса интерферометра, что снизило уровень помех при передаче сигналов по длинным кабелям. Использование специального режима с запоминанием направления счета полос позволило увеличить скорость движения стола установки до 1,0 м/с.

Известно, что неидентичность фазочастотных характеристик синусного и косинусного каналов электронного тракта преобразователя (в высокочастотной части их полосы пропускания) вызывает возникновение ошибочных ситуаций, когда при скоростях движения, близких к 0,8–1,0 м/с, дискриминатор направления производит в реверсивном счетчике переключение направления счета полос, приводящее к катастрофическим ошибкам в определении координат объекта. Была разработана специальная схема интерфейсного модуля с запоминанием направления счета полос. В его основу был положен простой постулат: на больших скоростях движения стола изменений направления счета не может быть в принципе. Поэтому, если специальный частотный детектор регистрирует факт, что частота следования импульсов превышает по модулю некоторое заданное значение, то текущее направление счета принудительно «замораживается» до тех пор, пока частота следования импульсов не станет ниже заданного порога. Возможно также появление ошибок из-за группирования импульсов, вызванного неидентичностью формы фазочастотных характеристик обоих каналов. Ошибки такого рода связаны с наличием у счетчиков импульсов «мертвого времени». Здесь возможны два пути решения проблемы: первый – «привязка» импульсов к некоторой сетке частот, второй – счет импульсов только от одного канала, но с удвоенным «весом». Как правило, второй путь обеспечивал более высокую стабильность процедуры счета. Технические параметры интерферометрических преобразователей комплекса «Зенит-2», приведенные в таблице, были достаточно высокими в сравнении с аналогичными приборами того времени.

Вторая модульная конструкция интерферометра перемещений была создана в 1980 г. Интерфейсные и регистрирующие модули преобразователя были выполнены в стандарте КАМАК. Модуль интерферометра имел два оптических информационных выхода, для каждого из которых был предусмотрен отдельный фотоприемный модуль. На основе этой модели интерферометра были созданы прецизионные системы управления перемещениями портала в лазерных фотопостроителях ИАиЭ [26] и особо точные системы ЧПУ для серийных токарных полуавтоматов 1725РФЗ Сасовского станкостроительного производственного объединения [27].

Дальнейшее развитие работ на основе интерферометра с внутренней фазовой модуляцией связано с комплексом «Океан» [28, 29]. Комплекс был создан в 1982 г. для изучения тонкой структуры поля плотности морской воды. В его состав входил погружаемый до 500 м зонд 1 (рис. 4) с набором датчиков и бортовым компьютером. Основой зонда являлся лазерный рефрактометр, в котором на одних и тех же элементах собраны два интерферометра, включенные по дифференциальной схеме. В состав рефрактометра входят: лазер 3, коллиматор 4, расщепитель пучков 5, светоделительный кубик 6, уголкового отражатель 7, закрепленный на пьезоэлементе 8. Измерительные плечи интерферометров образованы общим уголкового отража-

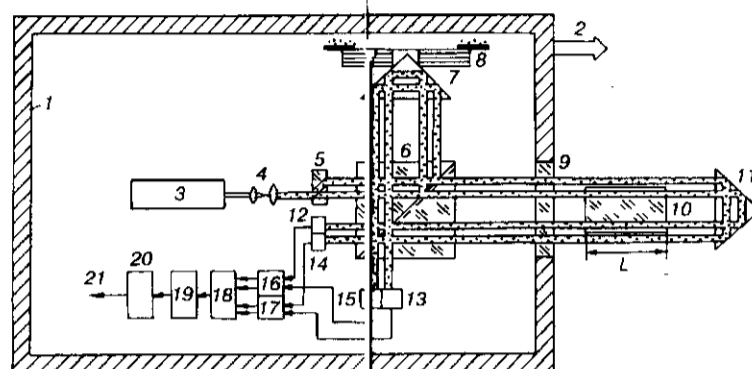


Рис. 4

телем 11, размещенным в водной среде и зафиксированным в пространстве специальным держателем, обеспечивающим хорошую промываемость измерительного объема. В измерительные плечи обоих интерферометров входит иллюминатор 9. Кроме того, в измерительное плечо внутреннего интерферометра входит стеклянный столбик 10. Фотоприемники 12-15, формирователи импульсов 16 и 17, цифровой вычитатель 18, реверсивный счетчик 19 и буферный выходной регистр 20 представляют собой электронную часть преобразователя.

Излучение лазера 3 делится расщепителем 5 на два пучка, распространяющихся параллельно друг другу на расстоянии 5 мм, причем во внешнем интерферометре излучение измерительного плеча проходит в воде, а излучение измерительного плеча внутреннего интерферометра — в воде и в стеклянном столбике 10. Стеклянный столбик выполняет функции стандарта оптической длины L . Условно внешний интерферометр получил название измерительного, а внутренний — опорного. Оптические сигналы опорного интерферометра поступают на фотоприемники 12 и 13, а измерительного — на 14 и 15. Формирователи импульсов 16 и 17 имеют по два выхода. На одних формируются импульсы для счета со знаком «+», а на других — со знаком «-». Цифровой вычитатель имеет четыре входа (два для сложения и два для вычитания). Для реализации дифференциального включения интерферометров на входы сложения поданы сигналы с выхода «+» измерительного интерферометра и с выхода «-» опорного интерферометра, а на входы вычитания — сигналы с выхода «-» измерительного интерферометра и с выхода «+» опорного. В результате на вход реверсивного счетчика 19 поступают импульсы, число которых пропорционально изменениям разности хода в воде на длине L . Любые другие приращения разности хода, обусловленные, например, прогибом иллюминатора, температурными изменениями линейных размеров конструкции держателей, колебаниями пьезоэлемента и т. д., полностью компенсируются. При этом информация о взаимном расположении интерференционных полос (и соответственно импульсных сигналов на выходах формирователей 16 и 17) может быть использована для измерения приращения фазы сигналов в пределах дискреты реверсивного счетчика.

Проблема повышения разрешающей способности преобразователей, входящих в состав систем управления перемещениями прецизионных

координатных столов, возникла в лаборатории в связи с выполнением работ по форматированию мастер-дисков магнитооптической памяти [30]. Согласно международным стандартам, на поверхности этих дисков должна быть сформирована спиральная дорожка с шагом $1,6 \pm 0,05$ мкм. При разрешающей способности преобразователя, равной $\lambda/8$ ($\approx 0,08$ мкм), это требование не могло быть выполнено должным образом, так как система управления позиционировала стол с ошибкой, достигающей пяти дискрет. В результате наблюдалась недопустимо большая неравномерность периода следования сформированных спиральных дорожек ($\approx 0,4$ мкм). Эксперименты с магнитоэлектрическим дефлектором, подключенным с помощью цифроаналогового преобразователя к выходу реверсивного счетчика для компенсации ошибок системы, показали, что для надежной коррекции неравномерности периода дорожек дефлектор должен иметь частоту среза амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) не ниже 300 Гц. Применяя метод синхронного считывания с интерполяцией дробных долей, можно рассчитывать на получение частоты среза АЧХ системы управления не более 80 Гц, что явно недостаточно для решения задачи. Поэтому для повышения разрешающей способности преобразователя, используемого в качестве элемента обратной связи прецизионной системы управления, применялись другие методы.

В новой модели лазерного фотопостроителя, созданного в эти годы в лаборатории [31], разрешающая способность лазерно-интерферометрического преобразователя была увеличена до $\lambda/64$ за счет повышения в два раза чувствительности интерферометра (была использована схема интерферометра с двойным ходом лучей) и применения интерполятора на основе многофазного потенциометрического фазовращателя. Упрощенная функциональная схема преобразователя представлена на рис. 5. В этой конструкции оптический центр трипель-призмы 5 измерительного плеча смещен по вертикали относительно оптической оси интерферометра 2. В результате отраженный призмой 5 луч попадает на вспомогательную прямоугольную призму 6, которая возвращает его на призму 5. После отражения призмой 5 он возвращается в интерферометр 2 и вместе с лучом из референтного плеча 3 проходит к ресиверам 7.1 и 7.2. С выхода ресиверов в блок обработки передаются аналоговые сигналы $\sin x$ и $\cos x$. В этом блоке сигналы поступают на входы четырех формирователей импульсных сигналов (8.1–8.4). На входах формирователей 8.2–8.4 стоят потенциометрические фазовращатели, которые сдвигают по фазе выходные сигналы формирователей (для второго формирователя – на $22,5^\circ$, для третьего – на 45° и для четвертого – на $67,5^\circ$). Дискриминаторы направления счета 9.1–9.4 формируют каждый для своей пары сигналов счетные импульсы, которые подаются на схемы ИЛИ (10.1 и 10.2). Так как импульсы, сформированные дискриминаторами 9.1–9.4, не перекрываются, то они образуют поток импульсов, каждому из которых соответствует перемещение отражателя 5 на $\lambda/64$ (или $\approx 0,01$ мкм). Для компенсации наведенной фазовой модуляции генератор 12 синхронно с формированием сигнала возбуждения пьезоэлемента 4 вырабатывает две последовательности компенсирующих импульсов (по 16 импульсов в каждой). Основным недостатком схемы – пониженное почти на порядок быстродействие. Максимально допустимая скорость перемещения стола в данной конструкции лазерного фотопостроителя не превышает 35 см/с. Более высокие показатели были реализованы с помощью лазерно-интерферометрических преобразователей нового, четвертого поколения.

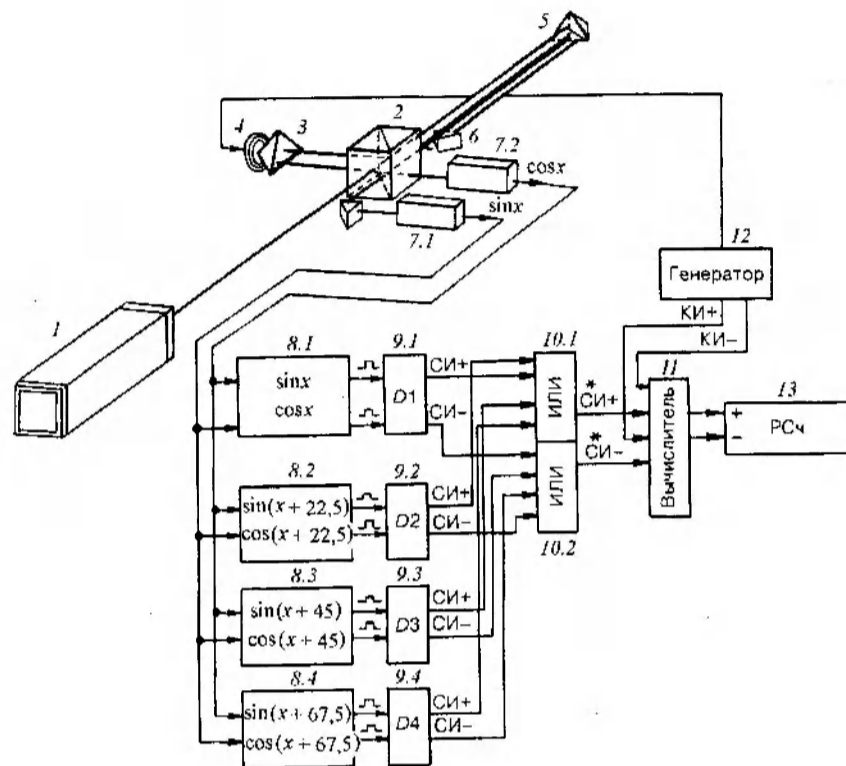


Рис. 5

4. Лазерные измерители перемещений четвертого поколения. В связи с разработкой в КТИ НП коммерческой версии лазерного фотопостроителя, ориентированной на экспортные поставки [32], была создана новая модель лазерно-интерферометрического преобразователя, предназначенная для применения в составе прецизионных систем управления перемещениями. В этой модели используется поляризационный интерферометр (рис. 6) с дифракционным светоделителем выходного пучка [33]. Линейно поляризованное излучение лазера 1 проходит через четвертьволновую пластину 2, преобразуется в циркулярно поляризованное и поступает на вход интерферометра. Поляризационный светоделительный кубик 3 пропускает компоненту с вертикально ориентированным вектором поляризации на уголкового отражатель 5, а компоненту с горизонтальным вектором поляризации отражает на уголкового отражатель референтного плеча. Отраженный призмой 5 пучок проходит через кубик 3 без изменения направления и выходит из интерферометра. В свою очередь отраженный призмой 4 пучок при прохождении кубика 3 вновь отражается и выходит из интерферометра в одном направлении с излучением из измерительного плеча. Имея взаимно ортогональные векторы поляризации, эти пучки не взаимодействуют между собой. Для того чтобы получить интерференцию, в ресивере 6 установлена четвертьволновая пластина 7. С помощью дифракционной решетки 8 суммарный пучок разделяется между фотоприемниками 10.1–10.3. Поляриды 9.1–9.3 вносят необходимый фазовый сдвиг в выходные сигналы фотоприемников. С помощью операционных усилителей 11.1–11.3 и 12.1–12.4 форми-

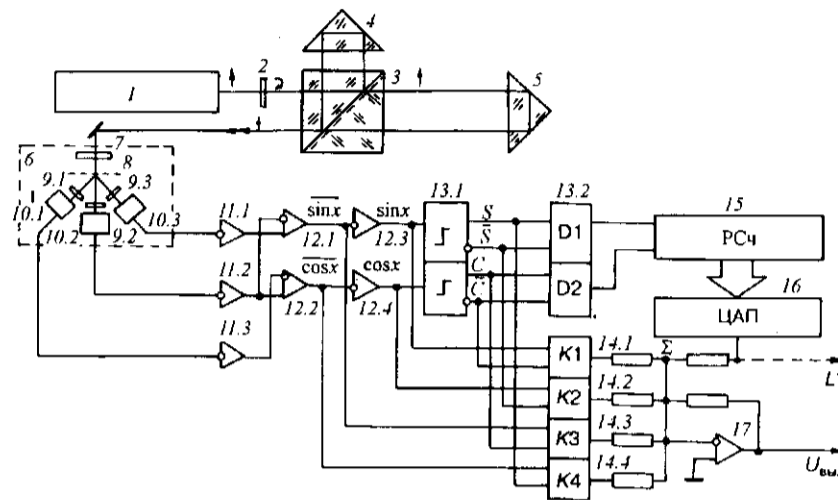


Рис. 6

руются квадратурные сигналы $\sin x$, $\overline{\sin x}$, $\cos x$ и $\overline{\cos x}$. Дискриминаторы направления счета 13.1 и 13.2 вырабатывают импульсные логические сигналы для управления счетчиком 15 и потенциальные логические сигналы для управления ключами 14.1–14.4. Цифроаналоговый преобразователь 16, подключенный к выходам реверсивного счетчика 15, формирует ступенчатый сигнал L^* (рис. 7, к). Этот сигнал с точностью до $\lambda/8$ пропорционален величине и знаку отклонения $\Delta X(t)$ объекта от первоначального положения. График изменения во времени представлен на рис. 7, а. Под воздействием управляющих сигналов, сформированных дискриминаторами 13.1 и 13.2, ключи 14.1–14.4 пропускают на выход части квадратурных сигналов таким образом, что на выходе суммирующего усилителя образуется сигнал Σ , который, будучи сложен с сигналом L^* , даст новый сигнал $U_{\text{вых}}$ (рис. 7, м) [34]. Использование для управления сигнала $U_{\text{вых}}$, форма которого тождественна форме исходного сигнала $\Delta X(t)$, резко снижает погрешность позиционирования стола, определяемую в этом случае только шумами электронного тракта. Экспериментально была зарегистрирована возможность перемещать стол на аэростатических направляющих шагами, меняющимися в пределах от двухсот миллиметров до единиц нанометра.

Опыт применения этой модели преобразователя в системах управления прецизионными столами нескольких лазерных фотопостроителей показал, что, наряду с положительными аспектами (высокая чувствительность, отсутствие принципиальных ограничений на быстродействие системы), преобразователи, созданные по этой схеме, имеют серьезный недостаток. Он состоит в том, что в моменты движения стола информация о его мгновенном положении доступна управляющему компьютеру только с точностью «грубого» шага, равного 80 нм ($\lambda/8$), в то время как в точках позиционирования стол устанавливается системой с дискретностью не более 1–2 нм ($\lambda/500$). Эта особенность не позволяет активно управлять записью изображений в процессе движения стола и задавать границы формируемых интервалов с существенно более мелким, чем $\lambda/8$, шагом.

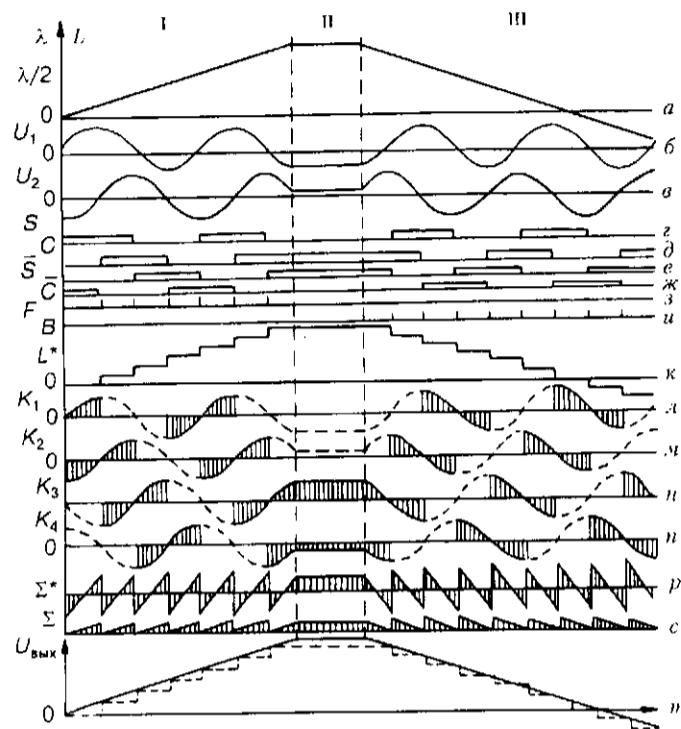


Рис. 7

Подобного рода осложнения не возникают в схемах с предварительной оцифровкой выходных квадратурных сигналов. Последующая цифровая предобработка данных позволяет получить мгновенные значения фазы квадратурных сигналов и использовать эту информацию для оперативного управления процессом позиционирования. Известно несколько вариантов построения лазерно-интерферометрических преобразователей с цифровой предобработкой сигналов. Большинство из них требует весьма быстрое действие логических элементов и сверхскоростной памяти. В [35] рассмотрена конструкция преобразователя, созданного для новой модели лазерного фотопостроителя, в которой удалось оптимально соединить высокую разрешающую способность (не менее $\lambda/1024$), высокое быстродействие (скорость перемещения > 1 м/с) и умеренные требования к скоростным характеристикам применяемых элементов. Умеренность скоростных требований к элементам объясняется тем, что последующая обработка цифровых сигналов для получения мгновенных значений фазы с дискретностью на уровне $\lambda/1024$ производилась после того, как были сформированы сигналы управления реверсивным счетчиком. В этом случае скоростные показатели процесса счета полос не зависят от скорости выполнения операций преобразования мгновенных значений выходных квадратурных сигналов в мгновенные значения фазы. Восемьразрядные аналого-цифровые преобразователи с частотой квантования 14 МГц позволили создать достаточно совершенные лазерно-интерферометрические преобразователи. Они обеспечивают разрешающую способность, равную 0,6 нм, и допускают скорость перемещения

объекта до 1,1 м/с. Применение этих преобразователей в составе цифровых систем управления позволило реализовать предельные для механических систем параметры. По совокупности технических характеристик данные преобразователи находятся в одном ряду с такими изделиями, как ZMI-1000 (фирмы "Zygo", США), HP 10897A ("Hewlett-Packard", США), ALIS-1 ("Konica", Япония) и др.

Заключение. Как показывает данное исследование, за тридцать лет развития лазерной интерферометрии перемещений в ОИАиЭ СО РАН производство оптико-механических компонент лазерно-интерферометрических преобразователей в лабораториях ИАиЭ и КТИ НП изменилось не существенно. В основном эти изменения проявились во все более широком применении модульных конструкций и поляризационной техники. Главный же резерв развития лазерно-интерферометрических преобразователей перемещений состоял в совершенствовании электронных систем обработки данных. Это позволило, вместо сравнительно громоздких приборов на фотоэлектронных умножителях, радиолампах, газоразрядных индикаторах и числоимпульсных вычислительных устройствах, создать компактные высокоскоростные приборы, в которых используются сверхбольшие интегральные схемы, многоэлементные фотоприемники, цифровая обработка измерительной информации, что обеспечивает выход на предельные для механических систем параметры, лежащие уже в диапазоне субнанометров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peck E. R., Obetz S. W. Wavelength or length measurement by reversible fringe counting // JOSA. 1953. 43. P. 505.
2. Cook H. D., Marsetta L. A. An automatic fringe counting interferometer for use in the calibration of line scale // C. Engineering and Instrumentation // J. of Research of National Bureau of Standards. 1961. 65C, N 2.
3. Arecchi F. T., Sona A. Long-distance interferometry with a He-Ne laser // Microwave Research Institute Series, 14 // Proc. of the Symposium on Quasi-Optics. Brooklyn: Polytechnic, 1964. P. 623.
4. Minkowitz S., Reid Smith Vanir W. // J. Quantum Electronics. 1967. 3. P. 237.
5. Майер Ж.-П. Применение фурье-спектроскопии в ближней инфракрасной области к астрономическим проблемам // Инфракрасная спектроскопия сверхвысокого разрешения: Пер. с франц. / Под ред. Г. Н. Жичина. М.: Мир, 1972. С. 128.
6. Смирнов В. А. Введение в оптическую радиотехнику. М.: Сов. радио, 1973.
7. Glantschnig F., Leroux M., Mottier F., von Willisen F. K. An automatic fringe-counter laser interferometer for application to industrial metrology // Laser and Unconventional Optics Journ. 1967. N 8.
8. Barringer B. W., Ronner A. I. A commercial laser interferometer for length measurement by fringe counting // The Radio and Electronic Engineering. 1970. 40, N 1.
9. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Лазерный интерферометр для измерения длины // Автометрия. 1971. № 1. С. 4.
10. Кирьянов В. П., Клисторин И. Ф., Щербаченко А. М. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений // Там же. С. 21.
11. Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Клисторин И. Ф., Кокшаров М. А. Принципы построения счетно-вычислительных устройств в лазерных измерителях перемещений // Автометрия. 1973. № 3. С. 46.

12. Вeдepннкoв В. М., Кирьянов В. П., Матиенко Б. Г., Щербаченко А. М. Микроэлектронный счетно-вычислительный блок лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2 // Автометрия. 1975. № 5. С. 53.
13. Golubkova V. P., Koronkevich V. P., Kiryanov V. P. et al. Laser interferometers for measurement and determining position object // Appl. Opt. 1972. N 2.
14. Дoбpoвa С. Я., Зoлoтoв A. B., Лeвaнoвcкaя Н. E. и др. Прoмышлeнный лaзeрный измepитeль пeрeмeщeний ФOУ-1 // Автометрия. 1975. № 5. С. 43.
15. Dukes J. N., Gordon G. B. Two-hundred-foot yardstick with graduations every microinch // Hewlett-Packard J. 1970. 21, N 12. P. 2.
16. Aтyгoв С. Н., Бeссмeльцeв В. П., Бурнaшoв В. Н. и др. Измepитeль углoвых и линeйных пeрeмeщeний нa oснoвe двyxчacтoтнoгo лaзeрa // Автометрия. 1975. № 5. С. 48.
17. A. с. 469359 СССР. Спoсoб измepения линeйных пeрeмeщeний /В. М. Вeдepннкoв, В. П. Кирьянов, И. Ф. Клицтoрин и др. Oпyбл. 1975, Бюл. № 16.
18. Кирьянов В. П., Коронкевич В. П. Лазерный интерферометр с низкочастотной фазовой модуляцией // Квантовая электроника. 1982. № 7.
19. Вeдepннкoв В. М., Кирьянов В. П., Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Многофункциональный лазерный измеритель перемещений ИПЛ-10 // Лазерные интерферометры: Сб. науч. тр. Новосибирск: ИЛиЭ, 1978.
20. Виницкий А. С. Модулированные фильтры и следающий прием ЧМ сигналов. М.: Сов. радио, 1969.
21. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: ГИФМЛ, 1962.
22. Шмаков П. В. Телевидение. М.: Связьиздат, 1960.
23. Кирьянов В. П., Клицтoрин И. Ф., Кoкшaрoв М. A. Иcпoльзoвaниe oпepaции симмeтрирoвaния cигнaлoв для пoвышeния тoчнoсти измepения фaзы // Систeмы cбoрa и пepвичнoй oбpaбoтки измepитeльнoй инфoрмaции: Сб. нaуч. тр. Нoвocибирск: ИAиЭ, 1973.
24. Вeдepннкoв В. М., Кирьянов В. П., Лeбeдeв Г. A. Пpимeнeниe лaзeрных интepфepoмeтpoв для кoнтpoля и юcтиpoвки oтcчeтнoй cистeмы тяжeлых cтaнкoв // Стaнки и инcтpумeнт. 1978. № 4.
25. Бурый Л. В., Золотухин Ю. Н., Иванов В. А. и др. Автоматизированный комплекс обработки изображений // Автометрия. 1980. № 3. С. 41.
26. Вeдepннкoв В. М., Вьyхин В. Н., Кирьянов В. П. и др. Пpецизиoнный фoтoпocтpoитeль для cинтeзa элeмeнтoв // Автометрия. 1981. № 3. С. 3.
27. Коронкевич В. П., Мороз Ю. Н., Табачников Э. Б. и др. Исследование токарного станка с ЧПУ, оснащенного лазерными преобразователями перемещений ИПЛП. Новосибирск, 1986. (Препр. /АН СССР. Сиб. отд-ние, ИАиЭ; 324).
28. Бaeв С. Г., Вeдepннкoв В. М., Кирьянов В. П. и др. Пoвышeниe тoчнoсти измepений тoнкoй cтpуктypы пoля плoтнoсти мoрcкoй вoды. Влaдивocтoк, 1985. (Пpепp. /АН СССР. Дaльнeвocтoчный нaучный цeнтp, ТOИ).
29. Бaeв С. Г., Вeдepннкoв В. М., Кирьянов В. П. Система сбора и обработки данных гидрофизического лазерного зондирующего комплекса // Автометрия. 1987. № 4. С. 75.
30. Cherkashin V. V., Kharissov A. A., Kiryanov V. P. et al. Fabrication of diffractive optical elements by laser writing with circular scanning // Proc. of 5 International Workshop DIP-94. Samara, 1994. P. 82.
31. Koronkevich V. P., Kiryanov V. P., Korol'kov V. P. et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning // Proc. SPIE. 1995. 2363. P. 290.
32. Kiryanov V. P. Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution // Laser Applications Engineering (LAE-96) /Ed. V. P. Veiko // Proc. SPIE. 1997. 3091. P. 66.
33. Кирьянов В. П., Ленкова Г. А., Лохматов А. И., Тарасов Г. Г. Новый лазерный интерферометр линейных и угловых измерений // Автометрия. 1994. № 4. С. 61.

34. **Кириянов В. П.** Метод прямого восстановления фазы квадратурных сигналов и его использование в системах позиционирования с нанометровым разрешением // Автометрия. 1997. № 3. С. 109.
35. **Кириянов В. П., Кокарев С. А.** Лазерно-интерферометрический преобразователь перемещений с субнанометровым разрешением // Автометрия. 1998. № 2. С. 3.

Поступила в редакцию 7 октября 1998 г.

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!