

УДК 004.03

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Базыкин С.Н.

ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, e-mail: cbazykin@yandex.ru

В статье рассматриваются проблемы измерения линейных величин и предлагается перемещение объекта определять путем сравнения этого перемещения с длиной волны стабилизированного по частоте лазера. При движении объекта меняется разность хода интерферирующих пучков и на выходе прибора наблюдают характерные изменения светового потока от минимального значения до максимального. Процедура измерения перемещения обязательно требует прохождения зеркалом информационно-измерительной системы контролируемого расстояния. При этом исходной мерой является естественная константа – длина волны стабилизированного лазера. В основу прибора положена классическая схема интерферометра Майкельсона с реверсивным счетчиком полос, которая не накладывает принципиальных ограничений на скорость движения отражателя. Таким образом, разработаны конструктивно-технологические решения проектирования информационно-измерительных систем на основе интерферометров, которые позволяют создавать информационно-измерительные системы линейных и угловых перемещений, скорости и ускорения линейного перемещения.

**Ключевые слова:** измерение, интерферометр, информационно-измерительная система, оптика, лазер

## INFORMATION-MEASURING SYSTEMS FOR MEASURING LINEAR DISPLACEMENTS

Bazykin S.N.

Penza State University, Penza, e-mail: cbazykin@yandex.ru

In the article the problems of measurement of linear values and proposes a moving object to determine by comparing this displacement with the wavelength of the frequency stabilized laser. When the object moves, changing the path difference of interfering beams and the output device observe characteristic changes of the light flux from minimum to maximum. The procedure for the measurement of displacement requires the passage of a mirror of the information-measuring system of the controlled distance. This initial measure is a natural constant – the wavelength of a stabilized laser. In the appliance based on the classic scheme of Michelson interferometer with a reversible counter of the bands, which does not impose major restrictions on the speed of movement of the reflector. Thus, the developed technological solutions of designing of information-measuring system based on interferometers, which allow you to create information-measuring systems of linear and angular displacements, velocity and acceleration linear motion.

**Keywords:** measurement, interferometer, information-measuring system, optics, laser

Лазерная информационно-измерительная система для измерения линейных величин определяет перемещение объекта путем сравнения этого перемещения с длиной волны стабилизированного по частоте лазера. Сравнение измеряемого отрезка осуществляется с помощью двухлучевого интерферометра. Одно из зеркал закрепляют на объекте, перемещение которого необходимо определить. При движении объекта меняется разность хода интерферирующих пучков и на выходе прибора наблюдают характерные изменения светового потока от минимального значения до максимального. Смещение зеркала на половину длины волны излучения, т.е. на одну полосу интерференционного поля, соответствует одному периоду в изменении светового потока. Число полос подсчитывается фотоэлектрической схемой и измеряемая длина вычисляется по формуле [1, 3, 5]

$$L = \frac{N\lambda_{\text{возд}}}{2}; \quad \lambda_{\text{возд}} = \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n_{\text{возд}}}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество целых и дробных частей числа полос;  $\lambda_{\text{вак}}$  – длина волны излу-

чения лазера в вакууме;  $n_{\text{возд}}$  – показатель преломления воздуха, в котором производится измерение.

Таким образом, процедура измерения длины обязательно требует прохождения зеркалом информационно-измерительной системы контролируемого расстояния [2, 4]. При этом исходной мерой является естественная константа – длина волны стабилизированного лазера.

Информационно-измерительные системы, выпускаемые отечественной промышленностью, реализуют метод обработки интерференционных сигналов на основе фазовой модуляции разности хода интерферирующих лучей. Для создания таких информационно-измерительных систем не требуется сложных и дорогостоящих акусто- или электрооптических ячеек, двухчастотных лазеров или вращающихся поляризационных элементов. Схема содержит минимальное число оптических деталей, одночастотный лазер на входе и реверсивный счетчик полос на выходе.

В основу прибора положена классическая схема интерферометра Майкельсона с реверсивным счетчиком полос, которая не

накладывает принципиальных ограничений на скорость движения отражателя [6, 7].

Коллимированное излучение лазера (рис. 1) направляют на акустооптический модулятор, в материале светозвукопровода которого распространяется ультразвуковая волна, возбуждаемая пьезоизлучателем от генератора. Режим бегущей ультразвуковой волны обеспечивает отражатель, развернутый относительно направления падающей на него ультразвуковой волны. В результате эффекта дифракции световой волны на ультразвуковой волне (дифракция Рамана – Ната) световая волна в пространственной и частотной области разделяется на дифракционные порядки. Проходящий свет или «0»-й дифракционный порядок направляется через светоделительный полупрозрачный кубик по двум идентичным каналам измерения. Каждый канал состоит из светоделителей интерферометра Майкельсона, референтного и измерительного уголкового отражателей. «+1»-й дифракционный порядок световой волны направляют на один измерительный канал, где он смешивается с «0»-м дифракционным порядком. «-1»-й дифракционный порядок световой волны направляют на другой измерительный канал, где он также смешивается с «0»-м дифракционным порядком.

Пространственная ориентация световых волн измерительного и опорного световых пучков обеспечивает совмещение спектров дифракционных порядков световых волн каждого канала таким образом, чтобы нулевой порядок дифракции измерительных волн совпадал с первыми порядками дифракции от референтных волн.

В результате фотосмещения пропускаемых на фотоприемники световых волн на выходе узкополосных усилителей выделяется электрический сигнал  $U_{\text{и}}$  на несущей частоте  $f_0$ , фаза которого синфазна фазе измерительной световой волны.

На рис. 2 приведена функциональная схема информационно-измерительной системы для измерения линейных величин. Здесь излучение лазера 1 коллимируется оптической системой 2 и разделяется полупрозрачным кубиком 3 на два пучка: один распространяется на измерительный отражатель 4 и обратно, второй отражается от опорного отражателя 5. На полупрозрачной грани кубика 3 они соединяются и интерферируют по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Угол отражения пучка, равный  $180^\circ$ , настраивается пространственной юстировкой зеркала, расположенного в фокальной плоскости фокусирующих линз отражателей.

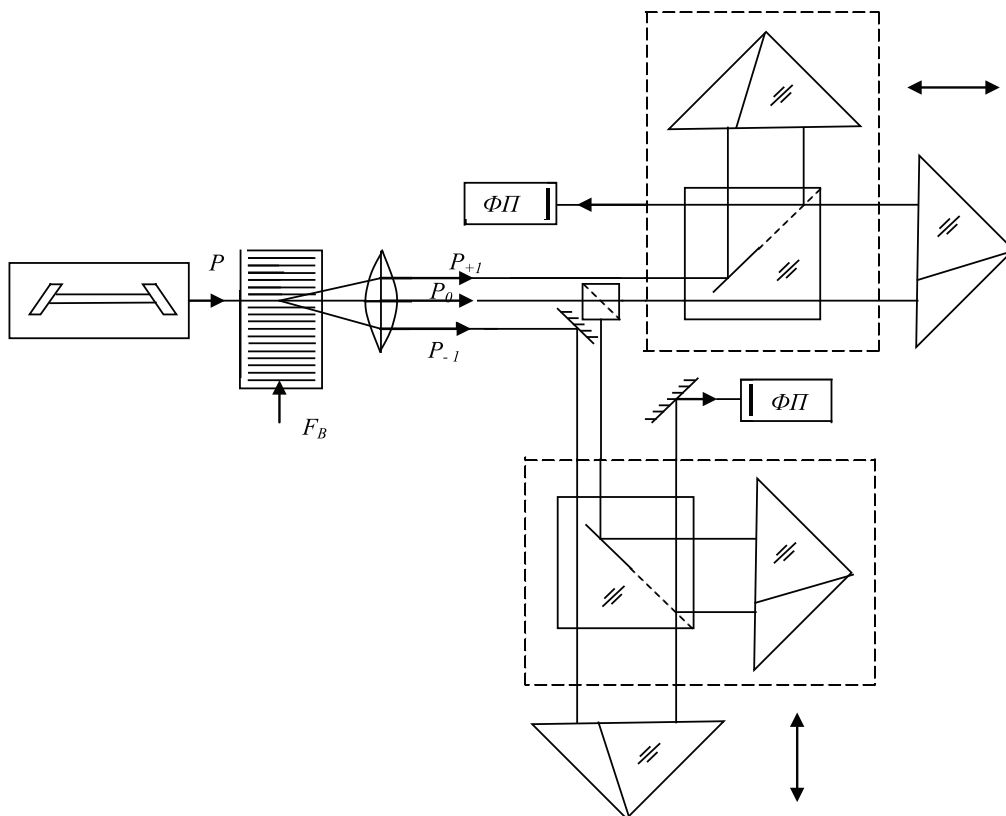


Рис. 1. Функциональная схема информационно-измерительной системы

В отражателе опорного пучка 5 фокальное зеркало наклеено на пьезовибратор, при работе которого создается синусоидальная модуляция оптического хода опорного пучка. Две пары интерферирующих световых волн, интерференционная картина в поперечном сечении которых сдвинута на  $\pm 90^\circ$  (в зависимости от направления движения), подаются на фотоприемники 7 и 8. На выходе этих фотоприемников выделяются измерительные сигналы, синхронные по времени, но сдвинутые на  $90^\circ$ .

Для этой цели в схему интерферометра введен фазовый модулятор 6, возбуждаемый генератором 14. Модулятор жестко связан с опорным отражателем 5. При этом подавление постоянной составляющей осуществляют, применяя разделительные фильтры.

Для разделения модулирующего и информационного сигналов применяется метод синхронного считывания, который не накладывает специальных условий на

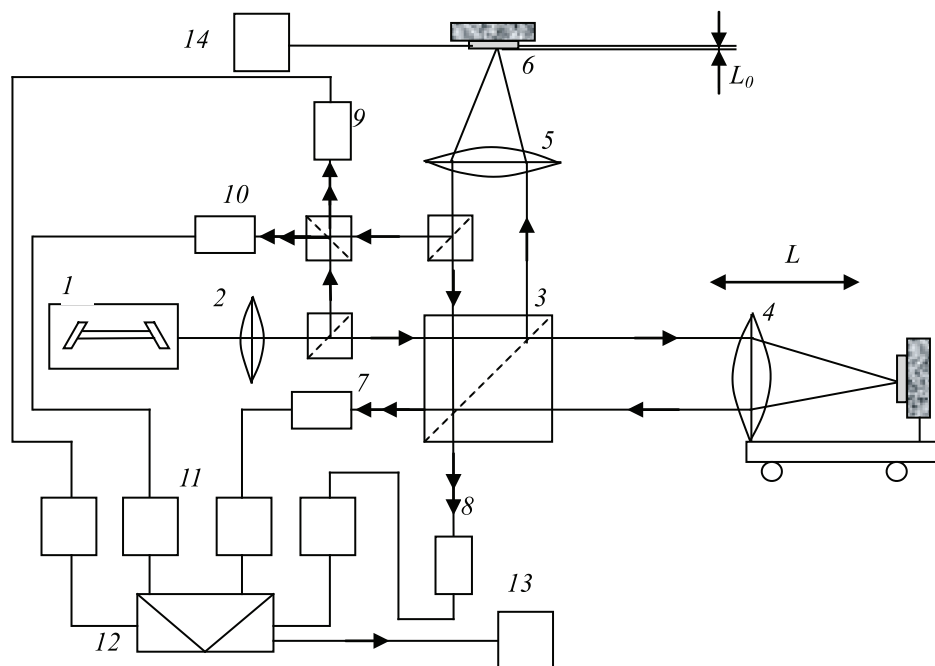


Рис. 2. Функциональная схема информационно-измерительной системы

Логическая схема 12 на основе соотношения значений фаз выходящих сигналов формирует счетные импульсы по передним и задним фронтам с усилителями 11 и селектирует их для суммирования или вычитания в реверсивном счетчике 13. Эта операция наиболее критична к нестабильным уровням сигнала  $U_0(t)$ , который зависит от температурных изменений порогов срабатывания электрических устройств и изменения освещенности на измерительной трассе.

Одним из известных приемов дискретизации постоянной составляющей является частотная фильтрация с помощью разделительных фильтров [3]. Операция реализуется наиболее просто, когда спектр помех не перекрывается со спектром полезного сигнала. В противном случае необходимо предварительно сместить спектр полезного сигнала, например, с помощью фазовой модуляции.

соотношение частот двух разделительных сигналов. Этот метод реализуется за счет передачи содержимого реверсивного счетчика 13 через буферный регистр в блок цифровой индикации при одном и том же значении модулирующего сигнала. Для этого в генераторе вырабатывается специальный строб-импульс переписи, формируемый при некотором фиксированном значении сигнала модуляции. Такая операция стробирования реализуется, если при любых начальных условиях сигнал достигает своих экстремальных значений хотя бы по разу за период модуляции. Это требование выполняется, если модуляция интерференционной картины осуществляется более чем на одну полосу, т.е.  $\frac{4\pi L_0}{\lambda_{\text{возд}}} \geq \pi$ . Необходи-

мость считывания информации в строго

определенные моменты времени является недостатком этого метода, но для широкого класса задач с визуальным фиксированием результатов измерения он не слишком существен. Например, при визуальной регистрации результатов частоту считываний достаточно установить не ниже 100 Гц, чтобы эффект периодизаций не сказывался. Для систем с периодическим опросом, например в датчиках обратной связи, частота фазовой модуляции должна быть синхронизована с тактовой частотой датчика.

Если приемник и источник излучения находятся в одной системе координат, а распространяющееся излучение отражается от другой, то при относительном движении этих двух инерциальных систем координат имеет место двухкратный эффект Доплера. Эффект Доплера заключается в изменении частоты регистрируемого волнового колебания (механического, акустического или электромагнитного) при относительном движении источника колебания и его приемника. В этом случае доплеровское приращение частоты отраженного излучения определяется по формуле [1, 3]

$$\pm v_d = \frac{2(\pm V)\cos\Theta}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны распространяемого излучения;  $V$  – линейная скорость перемещения объекта;  $\Theta$  – угол между направлением движения объекта и направлением излучения.

Противоположные знаки доплеровского сдвига и скорости движения объекта показывают положительное приращение частоты, если объект движется навстречу распространяющемуся на него излучению.

Таким образом, измеряя относительное изменение  $v_d$  во время движения объекта, можно регистрировать пропорциональное изменение скорости движения последнего. При неподвижном объекте ( $v_d = 0$ ) в процессе движения закон изменения  $v_d$  пропорционален доплеровскому сдвигу частоты.

Из формулы (2) видно, что при одной и той же скорости перемещения величина доплеровского сдвига будет больше для излучения с меньшей длиной волны. Следовательно, большей точностью обладают методы и устройства, использующие когерентное электромагнитное излучение оптического диапазона, длины волн которого измеряются единицами микрометров.

Но непосредственно обнаружить доплеровский сдвиг частоты на фоне временной частоты света (порядка  $4 \cdot 10^{14}$  Гц) фотоприемником в настоящее время невозможно, поэтому для выделения сигнала доплеровского сдвига используют эффект оптического гетеродинирования при интерференции измерительной и опорной волн, совмещенных в пространстве.

Наибольшее распространение получил одночастотный лазерный двухлучевой интерферометр Майкельсона. Излучение одночастотного стабилизированного лазера (рис. 3), используемого в качестве источника света, с помощью коллиматора расширяется и направляется неподвижным зеркалом на светоделительный кубик. На диагональной грани кубика излучение расщепляется на две равные по интенсивности части, одна из которых направляется на неподвижный отражатель (опорное плечо интерферометра), другая – на отражатель, связанный с движущимся объектом измерения (измерительное плечо

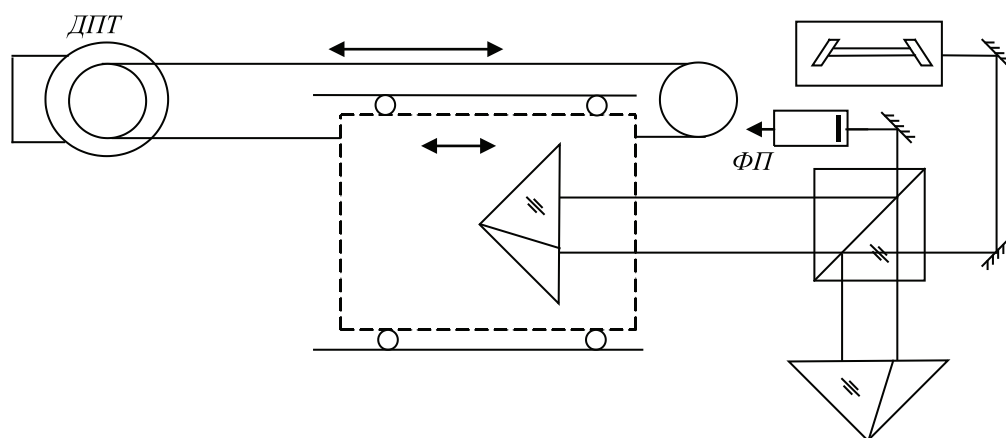


Рис. 3. Схема измерения скорости и ускорения перемещения объекта

интерферометра). Отраженные от обоих отражателей пучки совмещаются опять на светоделительной грани кубика и интерферируют по двум перпендикулярным направлениям от кубика.

От величины и ориентации угла фотосмещения зависят ширина и ориентация интерференционных полос перед фотоприемником.

При угле фотосмещения, равном нулю (направления совмещенных пучков совпадают), перед фотоприемником образуются полосы бесконечной ширины (ширина полосы занимает весь диаметр совмещаемых пучков). Результирующая интенсивность интерференционного поля  $I$  определяется выражением [3, 4]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности интерферирующих пучков;  $\varphi$  – разность фаз световых волн в интерферирующих пучках.

Поскольку в информационно-измерительной системе опорное плечо не изменяет своей длины, значение фазы этой световой волны остается постоянным.

Интенсивность света перед фотоприемником меняется по синусоидальному закону в соответствии с изменением значения фазы световой волны в измерительном плече интерферометра. Фаза измерительной световой волны непосредственно передается в значение фазы электрического выходного сигнала фотоприемника. Изменение оптического пути в измерительном плече интерферометра на  $\frac{\lambda}{2}$  мкм соответствует изменению фазы электрического сигнала на период ( $2\pi$  рад. или  $360^\circ$ ).

При движении отражателя измерительного плеча фаза интерференционного сигнала изменяется на величину [3]

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda_{\text{возд}}} \int_{t_1}^{t_2} v_d(t) dt = 2kL = N, \quad (4)$$

где  $t_2 - t_1 = t$  – время движения отражателя;  $v_d(t)$  – доплеровский сдвиг частоты измерительной световой волны;  $k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{возд}}}$  – волновое число;  $L$  – геометрический путь;  $N$  – целое и дробное число периодов изменения фазы за время движения  $t$ .

Величину линейного перемещения измерительного отражателя можно измерить посредством суммирования (непрерывного

подсчета) числа периодов изменения фазы интерференционного сигнала.

Накопленное число периодов  $N$ , уложенное на численное значение пространственного периода (половина длины волны измерения в воздухе  $\frac{\lambda_{\text{возд}}}{2}$ ), будет представлять величину линейного перемещения в метрической системе:

$$L = \frac{N\lambda}{2}. \quad (5)$$

Подсчет числа периодов производится счетчиком импульсов. Импульсы формируются после усиления, ограничения и выделения фронтов синусоидального сигнала фотоприемника.

Из выражения (5) видно, что скорость изменения фазы (временная частота интерференционного сигнала)  $\frac{d\varphi}{dt} = 2kv_d(t)$  пропорциональна скорости движения объекта, а скорость изменения частоты пропорциональна ускорению.

Измерение скорости и ускорения движения в лазерных информационно-измерительных системах производится посредством измерения доплеровской частоты за определенные промежутки времени. При этом результат измерения усредняется по времени.

Таким образом, разработаны конструктивно-технологические решения проектирования информационно-измерительных систем на основе интерферометров, которые позволяют создавать информационно-измерительные системы линейных и угловых перемещений, скорости и ускорения линейного перемещения.

#### Список литературы

1. Базыкин С.Н. Информационно-измерительные системы на основе интерферометров: моногр.; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.А. Васильева. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2014. – 132 с.
2. Базыкин С.Н. Проблемы информационного обеспечения систем с использованием оптоэлектронных средств измерения линейных перемещений // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-16173> (дата обращения: 13.12.2014).
3. Капезин С.В. Пространственные реперные точки в гетеродинных лазерных интерферометрах / С.В. Капезин, С.Н. Базыкин, Н.А. Базыкина // Датчики и системы. – 2005. – № 10. – С. 19–20.
4. Коронкевич В.П. Современные лазерные интерферометры перемещений / В.П. Коронкевич, В.А. Ханов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 181 с.
5. Патент РФ № 2083962, С16G01J9/02. Способ определения действительного значения длины волны лазерного излучения / Оpubл. 10.07.97, Бюл. № 19.
6. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. – СПб.: Лань, 2013.
7. Привалов В.Е. Лазерные интерферометры для механических измерений. – СПб.: Мех. ин-т, 1992 – 56 с.