

УДК 531.715.1

**ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
СМЕЩЕНИЙ ПРОБНЫХ МАСС, ВЫЗВАННЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ**

**Е.А. Лавров, Р.А. Давлатов, С.С. Донченко, П.Г. Харламов,
Ю.В. Гостев, Д.А. Соколов, Е.А. Карауш**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
lavrov@vniiftri.ru*

Рассматриваются схемы построения лазерных интерферометров, позволяющие решить задачу измерения смещений пробных масс до 1 мкм, вызванных воздействием гравитационных сил. Оценивается неисключенная систематическая погрешность измерений смещений лазерным интерферометром.

Ключевые слова: лазерный интерферометр, пробная масса, гравитационные силы

**LASER INTERFEROMETER FOR MEASUREMENT DIS-
PLACEMENTS OF PROOL MASS CAUSED BY ACTION OF
GRAVITATIONAL FORCES**

**E.A. Lavrov, R.A. Davlatov, S.S. Donchenko, P.G. Kharlamov,
U.V. Ghostev, D.A. Sokolov, E.A. Karaush**

*FSUE VNIIFTRI, Mendeleevo, Moscow Region
lavrov@vniiftri.ru*

The schemes of laser interferometers that allow us to solve the problem of measuring displacements of test masses up to 1 μm caused by action of gravitational forces is given. The non-excluded systematic error of displacement measurements by a laser interferometer is estimated.

Keywords: laser interferometer; test mass; gravitational forces

Введение

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» планируется создать экспериментальный стенд для моделирования градиентометрических измерений. Этот стенд может служить для:

- метрологического обеспечения создаваемых космических дальнометров на основе лазерного интерферометра;
- проверки алгоритмов вычисления вариаций гравитационного поля Земли при пролете космических аппаратов над аномалиями.

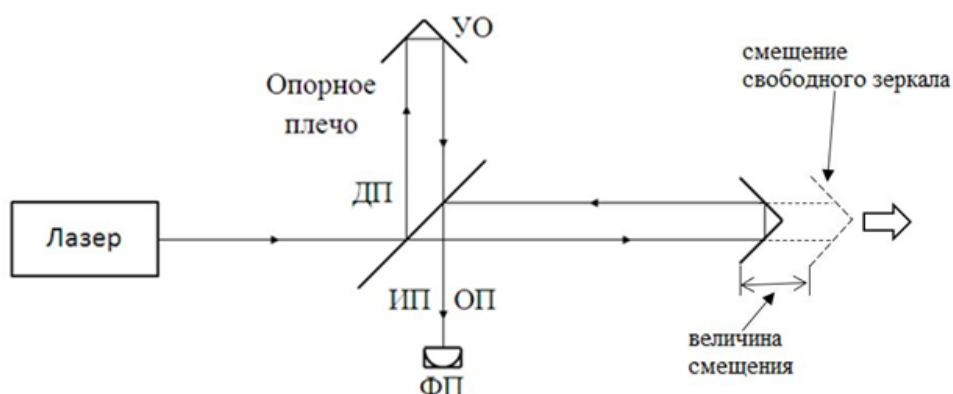
Для решения поставленной задачи необходимо разработать оптические схемы лазерных интерферометров для измерений малых смещений пробных масс до 1 мкм, вызванных воздействием гравитационных сил и оценить неисключенную систематическую погрешность измерений смещений лазерным интерферометром.

Рассмотрим классический вариант построения лазерного измерителя перемещений и оценим неисключенную систематическую погрешность измерения перемещения лазерным интерферометром.

Измеритель перемещений интерференционный на основе одночастотного высокостабильного лазера с известной частотой излучения

Лазерный интерферометр может быть реализован по схеме интерферометра Майкельсона с использованием высокостабильного лазера с известной частотой излучения, который расположен в закрытом защищенном помещении [1].

Принцип работы лазерного интерферометра можно пояснить с помощью классической схемы интерферометра Майкельсона, представленной на рис. 1.



ДП – делительная пластинка;

УО – уголкового отражатель;

ИП, ОП – измерительный и опорный пучки;

ФП - фотоприемник сигнала интерференции.

Уголкового отражатель измерительного плеча подвешен на нити длиной ≈ 10 м

Рис. 1. Упрощенная схема измерителя перемещений на основе одночастотного высокостабильного лазера с известной абсолютной частотой излучения

Пучок лазерного излучения с выхода высокостабильного лазера с длиной волны $\lambda \cong 0,532$ мкм разделяется на делительной пластине на два пучка: опорный и сигнальный, которые после отражения от опорного и от подвижного зеркал совмещаются на делительной пластине и, отразившись, направляются на фотодетектор для регистрации сигнала интерференции в зависимости от положения подвижного зеркала на измерительной линии Z .

На входе фотодетектора интерферирует световая волна от опорного плеча

$$E_0(x_1t) \equiv E_0 \cdot \sin(\omega t - k2x)$$

и от сигнального измерительного плеча:

$$E_c(z_1t) \equiv E_c \cdot \sin(\omega t - k2z),$$

где x и z – это расстояние от делительной пластины до опорного зеркала, z – расстояние до подвижного зеркала, ω – круговая частота лазера:

$$\omega = 2\pi\nu_l,$$

где ν_l – частота лазера, измерения относительно государственного первичного эталона частоты и времени с необходимой точностью, и K – волновое число:

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{c \cdot T} = \frac{2\pi}{c} \nu_l = \frac{\omega}{c},$$

где T – период световой волны.

Расчет ожидаемых метрологических характеристик лазерного интерферометра

Погрешности измерения длины перемещения лазерным интерферометром складывается из двух групп погрешностей:

- составляющей инструментальной погрешности лазерного интерферометра;
- составляющей погрешности, обусловленной влиянием метеопараметров среды, в которой распространяется световой сигнал.

Неисключенная систематическая погрешность измерения длины перемещения лазерным интерферометром равна:

$$\Theta = K \cdot \sqrt{\Theta_{\text{И}}^2 + \Theta_{\text{СР}}^2}, \quad (1)$$

где $\Theta_{\text{И}}$ – инструментальная погрешность; $\Theta_{\text{СР}}$ – погрешность, обусловленная влиянием метеопараметров среды; $K=1,1$ при доверительной вероятности $P=0,95$.

Рассмотрим составляющие погрешности более подробно.

Инструментальная погрешность $\Theta_{\text{И}}$ характеризует точность измерения длины в «идеальной атмосфере» в результате погрешностей, возникающих в узлах и блоках лазерного интерферометра и складывается из следующих составляющих:

- неисключенная погрешность измерений, связанная с неопределенностью частоты лазерного излучения $\Delta f \leq 10^{-9}-10^{-10}$. Поэтому вклад нестабильности частоты лазера в погрешность определения смещения на базе 0,5 м составляет: $\Theta_{\text{И}} \leq (0,05-0,5)$ нм.

Погрешность $\Theta_{\text{СР}}$ состоит из следующих компонент:

- неисключенная систематическая погрешность, связанная с конечной

точностью дисперсионной формулы коэффициента преломления атмосферы

$$\delta_{\text{сист.атм}} = 2,3 \cdot 10^{-8};$$

- погрешности, связанные с погрешностями измерения температуры δ_T ; влажности δ_{rh} ; давления δ_P ; концентрации углекислого газа δ_{CO_2} ;

- погрешность измерения температуры в точке 0,02 градуса и соответственно $\delta_T = 2 \cdot 10^{-8}$;

- погрешность измерения давления в точке 0,02 % и соответственно $\delta_P = 5,2 \cdot 10^{-8}$;

- погрешность измерения влажности в точке 2 % и соответственно $\delta_{rh} = 1,7 \cdot 10^{-8}$;

- погрешность измерения концентрации углекислого газа в точке 10 % и соответственно $\delta_{CO_2} = 7 \cdot 10^{-9}$.

Суммарная неисключенная систематическая погрешность, обусловленная влиянием метеопараметров среды

$$\delta_{CP} = K \cdot \sqrt{\delta_{\text{сист.атм.}}^2 + \delta_T^2 + \delta_P^2 + \delta_{CO_2}^2 + \delta_{rh}^2} = 6,9 \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

где $K = 1,1$ ($P = 0,95$).

Неисключенная систематическая погрешность измерения длины перемещения лазерным интерферометром, определяемая погрешностями измерения величин метеопараметров, составляет $\delta_{CP} = 6,9 \cdot 10^{-8}$ или $\Theta_{CP} = 6,9 \cdot 10^{-14}$ м (менее 10^{-4} нм) для смещения порядка 1 мкм.

Неисключенная систематическая погрешность, определяемая погрешностями измерения величин метеопараметров, как видно, вносит достаточно малый вклад. Но изменения метеопараметров за время измерения могут привести к дополнительному смещению. Поэтому необходимо обеспечить поддержку постоянства метеоусловий во время измерений.

Погрешности измерения длины, определяемые погрешностями измерения величин метеопараметров, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Связь погрешностей измерения величин метеопараметров и погрешности измерения длины

| Величина | Погрешность | Вклад в погрешность измерения длины/на единицу измерения, м | Составляющая погрешности измерения длины, м |
|--------------------------------------|---------------------|---|---|
| Температура | 0,02 °С | $1 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ |
| Влажность | 2 % RH | $8,7 \cdot 10^{-9}$ | $1,7 \cdot 10^{-8}$ |
| Концентрация CO ₂ | 10 % | $1,4 \cdot 10^{-10}$ | $7 \cdot 10^{-9}$ |
| Давление | 0,02 % | $2,6 \cdot 10^{-9}$ | $5,2 \cdot 10^{-8}$ |
| Неопределенность вычисления поправки | $2,3 \cdot 10^{-8}$ | 1 | $2,3 \cdot 10^{-8}$ |

Неисключенная систематическая погрешность измерения перемещения величиной 1 мкм лазерным интерферометром, вычисленная по формуле (1), равна:

$$\Theta = K \cdot \sqrt{\Theta_{\text{И}}^2 + \Theta_{\text{СР}}^2} \approx 0,55 \text{ нм.}$$

Способы установки рабочей точки фазового интерферометра

Для решения задачи измерений весьма малых перемещений пробных масс, вызванных воздействием гравитационных сил, предлагается несколько модернизировать оптическую схему, представленную на рис. 1.

В случае малых перемещений (менее одной полосы) плеча интерферометра встает проблема точного измерения фазового смещения. Для установки постоянной крутизны фазового измерителя требуется смещение плеча интерферометра в положение максимальной чувствительности. Для этого можно использовать пьезоактуатор с подачей на него постоянного и переменного напряжений (рис. 2).

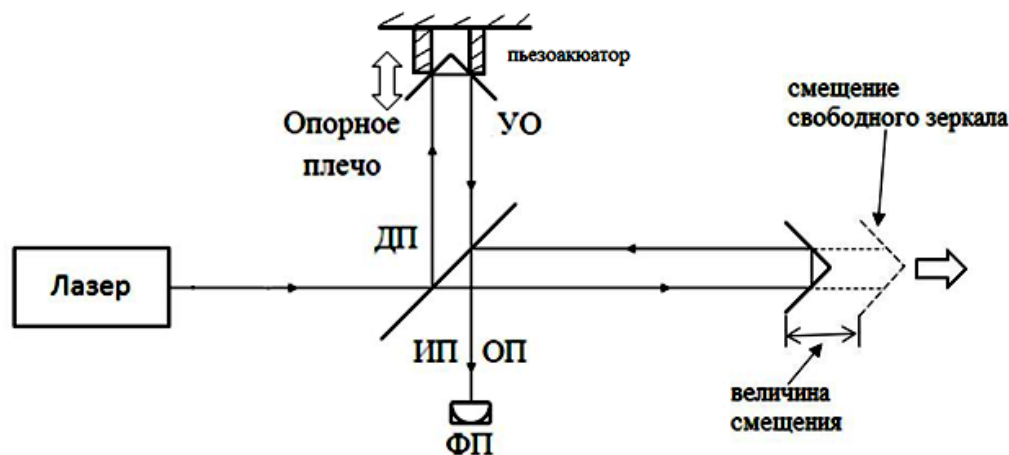


Рис. 2. Схема интерферометра, в котором измерение смещения свободного зеркала происходит путем контролируемого изменения длины опорного плеча

Постоянное напряжение подается для смещения рабочей точки фазового интерферометра, а переменным напряжением осуществляется сканирование по склону интерферометрической кривой (синусоиды, пика). По минимуму гармоник частоты переменного напряжения в фотосигнале интерферометра находится центр линейного участка склона.

После этого вносится воздействие на плечо интерферометра и измеряется изменение постоянной составляющей напряжения фотосигнала. Измерение постоянной составляющей может осуществляться при снятии переменного напряжения с пьезоактюатора или с постоянной подачей переменного напряжения. Интерферометр калибруется по зависимости изменения напряжения фотосигнала интерферометра от величины перемещения плеча.

Стандартный пьезоэлектрический модуль NF505D024W, поставляемый Thorlabs, позволяет сместить плечо интерферометра на 0,2 мкм при подаче на него менее 5 В напряжения. При подаче переменного напряжения с частотой до 100 Гц и амплитудой до 75 В нагрев модуля через 10 мин не превышает 10 градусов.

В небольших пределах постоянное и переменное сканирование по склону интерферометрической кривой может быть осуществлено акустооптическим сдвигателем частоты лазерного излучения, серийно выпускаемым ФГУП «ВНИИФТРИ» [2] (рис. 3).

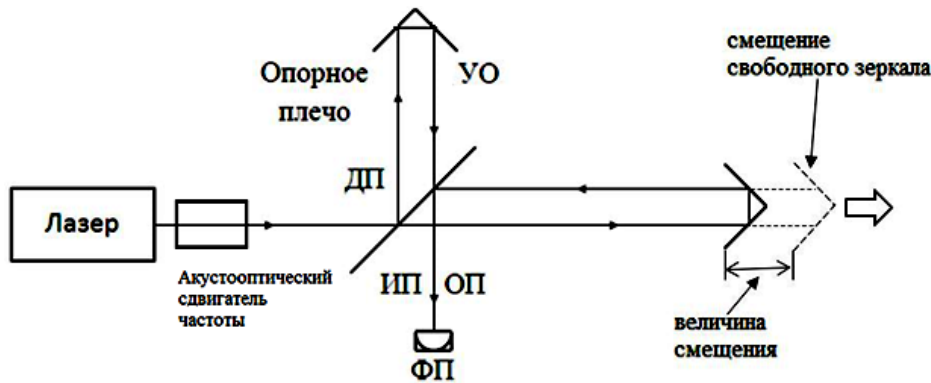


Рис. 3. Схема интерферометра, в котором измерение смещения свободного зеркала происходит путем изменения частоты лазерного излучения

Для измерения величины перемещения плеча с погрешностью 5 нм необходимо превышение уровня размаха фотосигнала над уровнем шумов в фотосигнале интерферометра для длины волны лазера 632,8 нм более чем в 30 раз. Параметры и требования к измерителю фотосигнала зависят от схемы измерений смещения.

Вклад в неисключенную систематическую погрешность измерения перемещения, вносимый акустооптическим сдвигом частоты лазерного излучения, при $\Delta f = 1$ Гц по предварительным оценкам составляет $0,8 \cdot 10^{-6}$ нм, или $0,8 \cdot 10^{-15}$ м (менее 10^{-6} нм).

Реализация схемы интерферометра с пьезосдвигом зеркала

Схема включает в себя пьезосдвигатель зеркала и регистратор нулевого сигнала интерференции. На пьезосдвигатель подается постоянное смещение и переменный синусоидальный сигнал. Одной из распространенных схем является регистрация четных гармоник сигнала модуляции, осуществляемая при помощи избирательного усилителя с узкой полосой. Однако, линейность пьезосдвигателя и всего приемного тракта может оказаться препятствием для достижения максимальной чувствительности. Преодолеть этот барьер можно применением дифференциальных пьезосистем из ниобата лития. Такие системы позволяют добиться исключения второй гармоники в механических колебаниях. Для обеспечения узкой полосы приема, с шириной в доли герца, необходимо использовать схемы синхронного детектирования с управляемой фазой. Уровень сигнала может быть достаточно мал из-за потерь в тракте интерферометра, принципиально узкой зоны регистрации

фотосигнала и принципиально низкого сигнала второй гармоники в точке перегиба. Реально это обозначает требование максимальной чувствительности на уровне единиц фотонов. Этот сигнал используется в системе обратной связи напряжения смещения пьезосдвигателя.

В такой системе по предварительным оценкам возможно обеспечить уровень погрешности измерений смещения $10^{-3} - 10^{-4}$ от длины волны, что соответствует десяткам-сотням пикометров ($10^{-2} - 10^{-1}$) нм.

Система регистрации смещения полос на основе матричного приёмника

При использовании системы регистрации смещения полос на основе матричного приёмника некоторая часть интерференционной картины может содержать несколько тысяч пикселей по одной координате при соответствующем проектировании оптической системы. Математическая обработка данных позволит определить координаты максимума интерференционной картины с точностью до $10^{-1} - 10^{-2}$ от пикселя. Подобные системы отработаны в датчиках звездной ориентации. Оптимистическая оценка чувствительности подобной системы составляет $10^{-4} - 10^{-5}$ от длины волны, что соответствует единицам пикометров ($\sim 10^{-3}$ нм).

Погрешность измерения фазового сдвига величиной $10^{-4} - 10^{-5}$ от длины волны при $\lambda=0,53$ мкм соответствует пространственной ошибке измерения около $0,5 \cdot (10^{-10} - 10^{-11})$ м. При вычисленном ранее коэффициенте масштабирования $N = 10^5$ это соответствует моделируемой ошибке радиотехнической системы измерения межспутникового расстояния величиной (0,5-5) мкм, что вполне соответствует точности реальной системы типа GRACE.

Выбор необходимого оборудования

Для реализации макета интерферометра необходимо следующее оборудование:

- источник лазерного излучения (лазер),
- блок фотоприемников,
- блок обработки и управления,
- блок делителя светового пучка с опорным каналом, включающим оптико-механические изделия,
- многоканальный прецизионный измеритель метеопараметров,
- программно-аппаратный комплекс управления интерферометром (компьютер со специализированным программным обеспечением (СПО)),

– подвижная прецизионная управляемая от ПЭВМ каретка для моделирования движения спутников по орбите.

Лазерные системы

Лазерная система, подобная «Орвилаз-535-SM-5-C», с тем отличием, что выходное излучение не будет частотно-модулированным. Достаточно иметь на выходе излучение с одной длиной волны $\lambda=532$ нм. Остальные параметры должны быть идентичны техническим параметрам «Орвилаз-535-SM-5-C» и приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры лазерной измерительной системы

| Наименование параметра | Значение | |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Длина волны, нм | 532, 1064 | |
| Диаметр пучка, мм | 0,5 | |
| Расходимость, мрад | 2 | |
| Мощность излучения, мВт | >5 на 532 нм >5 на 1064 нм | |
| Относительная нестабильность частоты | 1 с | $\pm 10^{-11}$ |

ОАО «Плазма» предлагает большой выбор гелий-неоновых лазеров. Излучение лазеров имеет низкий уровень шума, высокую стабильность и низкую расходимость пучка излучения.

Лазеры газовые He–Ne непрерывного режима работы, работающие на двух ортогонально поляризованных одночастотных составляющих излучения, предназначены для использования в качестве источников когерентного излучения в интерферометрии, оптической локации, волоконной связи технологических и лабораторных установках. Режимы работы: I — ортогонально поляризованные одночастотные составляющие разделены в пространстве (ЛГН–303), II — ортогонально поляризованные одночастотные составляющие совмещены в пространстве (ЛГН–303–1), III — на выходе лазера только одна высокочастотная составляющая с вертикальным вектором поляризации (ЛГН–303). Частотная стабилизация осуществляется путем терморегулирования длины резонатора. Основные характеристики приведены в таблице 3.

Основные характеристики газовых лазеров

| Параметры | ЛГН-303 | ЛГН-303-1 |
|---|-------------------|--|
| Длина волны, нм | 630 | |
| Спектральный состав | одночастотный | двухчастотный (разность между двумя ортогонально поляризованными компонентами лазерного излучения 640 МГц), двулучевой или однолучевой |
| Мощность излучения, мВт, не менее | 1,0 | |
| Диаметр пучка, мм, не более | 0,8 | |
| Расходимость, мрад, не более | 2,5 | |
| Относительная нестабильность мощности излучения за 8 ч, %, не более | 2 | |
| Относительная нестабильность оптической частоты не более | $1 \cdot 10^{-8}$ | |

Характеристики HRS015B стабилизированного красного He-Ne лазера фирмы Thorlabs приведены в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики красного He-Ne лазера фирмы Thorlabs

| | | |
|--|---------|-----------------------|
| Длина волны, нм | 632,991 | |
| Диаметр пучка, мм | 0,7 | |
| Расходимость, мрад | < 1,4 | |
| Мощность излучения, мВт | >1,2 | |
| Относительная нестабильность частоты | 1 мин | $\pm 2 \cdot 10^{-9}$ |
| | 1 ч | $\pm 4 \cdot 10^{-9}$ |
| | 8 ч | $\pm 6 \cdot 10^{-9}$ |
| Относительная нестабильность мощности излучения, % | 1 мин | $\pm 0,1$ |
| | 1 ч | $\pm 0,2$ |
| | 8 ч | $\pm 0,3$ |

Характеристики SL 04 стабилизированного He-Ne лазера фирмы Sios приведены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики стабилизированного He-Ne лазера фирмы Sios

| | | |
|---|------------|-----------------------|
| Длина волны, нм | 632,8 | |
| Диаметр пучка, мм | 0,55 | |
| Расходимость, мрад | 1,5 | |
| Мощность излучения, мВт | $\geq 1,2$ | |
| Относительная нестабильность частоты | 1 мин | $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ |
| | 1 ч | $\pm 2 \cdot 10^{-9}$ |
| | 24 ч | $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ |
| Относительная нестабильность мощности излучения с контроллером амплитуды, % | 0,2 | |

Блок фотоприемников

Блок фотоприемников предназначен для выделения сигнала картины интерференции двух сигналов, сдвинутых по фазе, и преобразовании его в электрический сигнал. Конструкция крепления фотоприемников зависит от реализуемой схемы интерферометра. Предлагается использовать фотоприемники ВРХ65.

Блок обработки и управления

Блок обработки и управления предназначен для обработки сигналов, полученных от фотоприемников, коррекции выходных данных с учетом метеусловий.

Блок делителя светового пучка с опорным каналом, включающим оптико-механические изделия

Примерный состав блока с указанием стоимости входящих в его состав изделий приведен в таблице 6.

Примерный состав блока делителя светового пучка с опорным каналом,
включающим оптико-механические изделия

| Наименование | Количество, шт |
|--|----------------|
| Куб светоделительный Newport 10BC17MB.1-532 нм | 1 |
| Пластина фазовая 10RP14-24 | 1 |
| Ретрорефлектор Newport UBBR1-1S | 2 |
| Стойка с регулируемой высотой Standa 3TPH-13 | 1 |
| Стойка Standa 3MP-50 | 1 |
| Стол трехкоординатный Standa 6PT169 | 1 |
| База магнитная MB175/M | 1 |
| Основание магнитное 3MB6 | 1 |
| Платформа C1506/M | 1 |
| Платформа 6TP116 | 1 |
| Подвижка вертикальная PSHA | 1 |
| Транслятор из алюминия 7T167M-50 | 1 |
| Стержень для держателей оптики 3MP-100 | 1 |
| Стойка Standa 3PHB-100 | 1 |
| Гайка запрессовываемая | 4 |
| Делитель поляризационный 05BC16PC.3 | 1 |
| Стойка P300/M | 1 |
| Стойка P125/M | 1 |

Продолжение таблицы 6

| Наименование | Количество, шт |
|---|----------------|
| Стойка Р100/М | 2 |
| Стойка Р75/М | 1 |
| Стойка Р50/М | 1 |
| Адаптер резьбовой ЗАН6-4 | 10 |
| Стержень для держателей оптики ЗМР-100 | 1 |
| Стержень для держателей оптики ЗМР-150 | 2 |
| Стержень для держателей оптики ЗМР-25 | 1 |
| ТА0505D024W - Пьезоэлектрический элемент с проводами, напряжение: 75 В, смещение: 2.8 мкм, Thorlabs | 3 |

Многоканальный прецизионный измеритель метеопараметров

Многоканальный прецизионный измеритель метеопараметров, входящий в состав интерферометра, предназначен для контроля метеоусловий и включает:

- датчик температуры воздуха с абсолютной погрешностью измерений температуры не более 0,02 °С. Диапазон измерений температуры от 10 до 30 °С;
- датчик относительной влажности воздуха с абсолютной погрешностью измерений не более 2 %. Диапазон измерений влажности от 10 до 90 %;
- датчик давления с абсолютной погрешностью измерений не более 15 Па. Диапазон измерений давления от 75 до 115 кПа.

Программно-аппаратный комплекс управления интерферометром и прецизионной кареткой

Программно-аппаратный комплекс управления интерферометром и прецизионной кареткой строится на основе компьютера с общим программным

обеспечением и СПО. Конкретная реализация СПО зависит от выбранной схемы интерферометра и условий его применения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022.

Заключение

Рассмотренные схемы построения лазерных интерферометров позволят решить поставленную задачу измерения смещений пробных масс до 1 мкм, вызванных воздействием гравитационных сил.

Литература

1. Lavrov E.A., Epikhin V.M., Mazur M.M., Suddenok Y.A., Shorin V.N. Development of Methods Precision Length Measurement Using Transported Laser Interferometer // *Physics Procedia*, 72 (2015), 222 – 226.
2. Epikhin V.M., Aprelev A.V., Lavrov E.A. Acoustooptical modulators for controlled frequency shift of light beams in systems of laser cooling / *International conference laser optics, 2018 (ICLO 2018), Saint Petersburg, 04-08 June 2018*, p.448.