

УДК 535.312.3

**ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В НЕИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА**

В.В. Богатырева

Предлагаются новые способы измерения параметров ускоренного движения, таких как угловая скорость, угловое и линейное ускорение. Принципы измерения основываются на том, что в неинерциальных (вращающихся или испытывающих линейное ускорение) системах отсчета на компоненты оптико-механических приборов действуют силы инерции, которые вызывают их относительные смещения и изменение траектории луча света относительно первоначальной. В статье описан предложенный нами способ измерения угловой скорости вращения, приведены результаты лабораторных исследований.

Ключевые слова: неинерциальные системы отсчета, угловая скорость, угловое ускорение, линейное ускорение.

Введение

Существует множество способов измерения параметров ускоренного движения, таких как угловая скорость, угловое и линейное ускорение. Их принципы основываются на магнитных, электрических, гироскопических явлениях, эффекте Саньяка и др. Недостатками являются невысокая чувствительность, за исключением волоконно-оптических гироскопов, чувствительность к электромагнитным воздействиям и пр. Поэтому актуальным вопросом остается создание измерителей параметров ускоренного движения с высокой чувствительностью, помехоустойчивостью, компактностью и экономичностью.

Мы предлагаем новые принципы измерения параметров ускоренного движения. Силы инерции, возникающие при вращении или линейном ускорении оптико-механических приборов, действуют на их компоненты и вызывают относительные смещения последних. Это приводит к изменению траектории лучей света в таких системах, что либо является источником помех при работе оптико-механического прибора, либо может быть использовано для получения полезной информации о параметрах ускоренного движения таких приборов. Регистрировать смещение компонентов оптических приборов можно двумя способами: по смещению луча света по поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника (однолучевые системы) и по изменениям интерференционной картины (двулучевые системы). Результат зависит от пространственного расположения компонентов, способа крепления на плоскости вращения.

Вращение интерферометра Фабри-Перо

Рассмотрим интерферометр, представляющий собой два зеркала, помещенных в полый цилиндр (рис. 1). Одно из зеркал (полупрозрачное) неподвижно закреплено относительно стенок цилиндра (на его торце), а другое (глухое) расположено на пружине параллельно первому (у другого торца), но может поступательно смещаться вдоль оси, перпендикулярной плоскостям зеркал.

При вращении цилиндра с угловой скоростью ω вокруг оси O , перпендикулярной оптической оси (на рисунках показана штрихпунктирной линией), на подвижное зеркало действует центробежная сила, равная

$$F_{цб} = m\omega^2 r, \quad (1)$$

где m – масса подвижного зеркала, r – радиус вращения подвижного зеркала. В противоположном направлении в сжатой пружине возникает сила упругости

$$F_{упр} = kx, \quad (2)$$

где k – коэффициент упругости пружины, определяющий сжатие пружины, а x – смещение подвижного зеркала. При этом из равенства правых частей выражений (1) и (2) следует, что угловая скорость равна

$$\omega = \sqrt{\frac{kx}{mr}}. \quad (3)$$

Величина x определяется по изменению интерференционной картины при изменении оптической разности хода лучей на величину

$$\delta\Delta = 2xn \cdot \cos \theta, \quad (4)$$

где n – показатель преломления среды между зеркалами интерферометра, θ – угол падения светового луча на поверхность интерферометра.

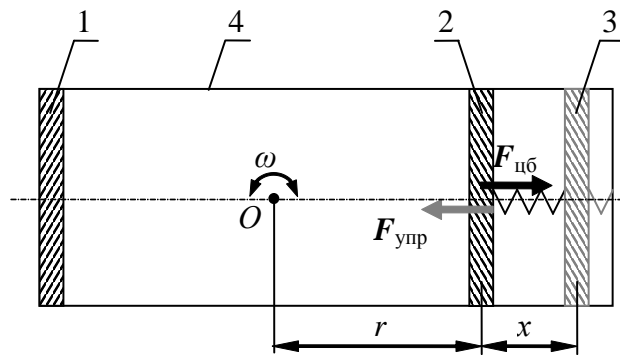


Рис. 1. Отклонение зеркала интерферометра Фабри-Перо при вращении: 1 – неподвижное зеркало; 2 – подвижное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное подвижное зеркало; 4 – полый цилиндр

Интерферометр Фабри–Перо под действием линейного ускорения

При линейном движении рассмотренного устройства вектор линейного ускорения a направлен вдоль оптической оси, как показано на рис. 2.

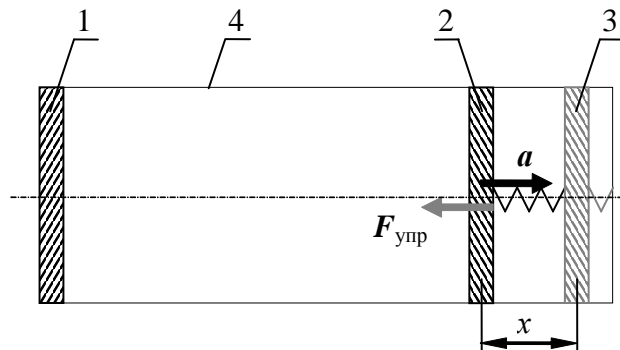


Рис. 2. Отклонение зеркала интерферометра Фабри–Перо под действием линейного ускорения: 1 – неподвижное зеркало; 2 – подвижное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное подвижное зеркало; 4 – полый цилиндр

Возникающая при этом сила ускоренного движения подвижного зеркала в соответствии со вторым законом Ньютона равна $F=ma$. Приравняв эту силу силе сжатия пружины, определяемой формулой (2), получаем, что ускорение движения равно

$$a = \frac{kx}{m}. \quad (5)$$

Смещение x подвижного зеркала определяется так же, как описано в предыдущем разделе, при этом оптическая разность хода лучей определяется формулой (4).

Вращение и линейное ускорение интерферометра Майкельсона

Пусть одно из зеркал интерферометра неподвижно закреплено на вращающемся основании, а второе закреплено на пружине так, что может смещаться только поступательно вдоль оптической оси OA (рис. 3).

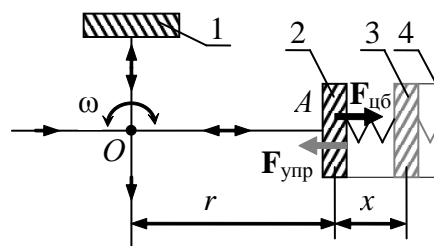


Рис. 3. Отклонение подвижного зеркала при вращении интерферометра Майкельсона: 1 – неподвижное зеркало; 2 – подвижное зеркало; 3 – смещенное подвижное зеркало; 4 – направляющий цилиндр для подвижного зеркала

Угловая скорость вращения прибора описывается формулой (3), а смещение x подвижного зеркала будет определяться по изменению оптической разности хода лучей, в этом случае равной $\delta\Delta = 2\lambda l$.

Аналогичная зависимость для изменения оптической разности хода наблюдается при линейном ускорении интерферометра Майкельсона вдоль оптической оси OA , но линейное ускорение a определяется формулой (5).

Вращение оптической системы, включающей зеркало, имеющее возможность вращаться вокруг собственной оси, перпендикулярной основанию

Рассмотрим два способа закрепления зеркала с возможностью его поворота вокруг оси, не совпадающей с осью вращения измерителя угловой скорости.

а) Зеркало крепится боковой гранью к стержню и может свободно вращаться вокруг него, с задней стороны зеркало демпфируется с помощью пружины (рис. 4). Под действием центробежной силы поворотное зеркало отклоняется от исходного положения на угол α , который, в свою очередь, определяется силой упругости, возникающей в сжатой пружине.

Центробежная сила определяется выражением (1). Сила упругости рассчитывается по формуле

$$F_{упр} = k_{\alpha} \alpha, \quad (6)$$

где k_{α} – угловой коэффициент пропорциональности пружины, определяемый ее геометрическими и физическими свойствами. Смещение луча Δx регистрируется с помощью позиционно-чувствительного фотоприемника (ПЧФП) (рис. 5) и для нормального падения луча на зеркало в исходном положении равно

$$\Delta x = l \cdot \operatorname{tg}(2\alpha), \quad (7)$$

где l – расстояние от точки падения луча света на зеркало до рабочей поверхности ПЧФП.

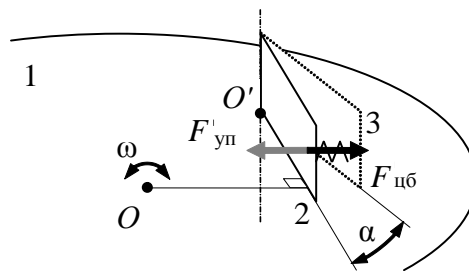


Рис. 4. Смещение поворотного зеркала, установленного на вращающемся основании и имеющего собственную ось вращения: 1 – вращающееся основание; 2 – поворотное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное поворотное зеркало

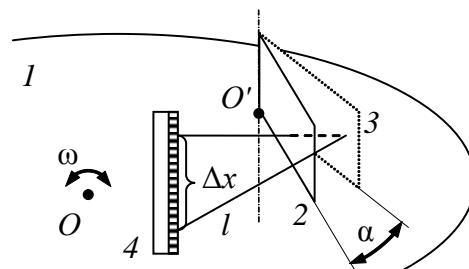


Рис. 5. Изменение координаты отраженного луча при вращении оптической системы: 1 – вращающееся основание; 2 – исходное положение зеркала; 3 – отклонившееся зеркало; 4 – ПЧФП

Из равенства правых частей формул (1) и (6) с подстановкой угла α из формулы (7) следует, что угловая скорость равна

$$\omega = \sqrt{\frac{k_\alpha \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta x}{l}\right)}{2mr}},$$

где r – расстояние от оси вращения измерителя угловой скорости до плоскости зеркала в исходном положении.

б) Зеркало крепится с помощью пластины перпендикулярно основанию и может поворачиваться вокруг собственной оси за счет изгиба пластины (рис. 6).

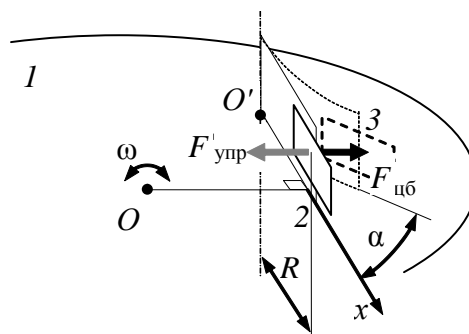


Рис. 6. Смещение поворотного зеркала, установленного на вращающемся основании и имеющего собственную ось вращения: 1 – вращающееся основание; 2 – поворотное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное поворотное зеркало

Под действием центробежной силы поворотное зеркало отклоняется от исходного положения на угол α , который, в свою очередь, определяется силой упругости, возникающей в сжатой пружине. Центробежная сила определяется выражением (1). Сила упругости рассчитывается по формуле [1]

$$F_{\text{упр}} = \frac{2EJ_z \alpha}{R^2}, \quad (8)$$

где E – модуль Юнга, J_z – момент инерции, определяемый профилем крепежной пластины, R – расстояние от оси вращения пластины до точки крепления зеркала. Из равенства правых частей (1) и (8) угловая скорость равна

$$\omega = \sqrt{\frac{2EJ_z \alpha}{mrR^2}}. \quad (9)$$

Угол α рассчитывают по выражению (7) из смещения x луча по поверхности ПЧФП.

Использование описанных эффектов для определения параметров движения в неинерциальных системах отсчета

Полученные выводы можно использовать для определения параметров ускоренного движения. Например, нами предложен измеритель угловой скорости вращения [2].

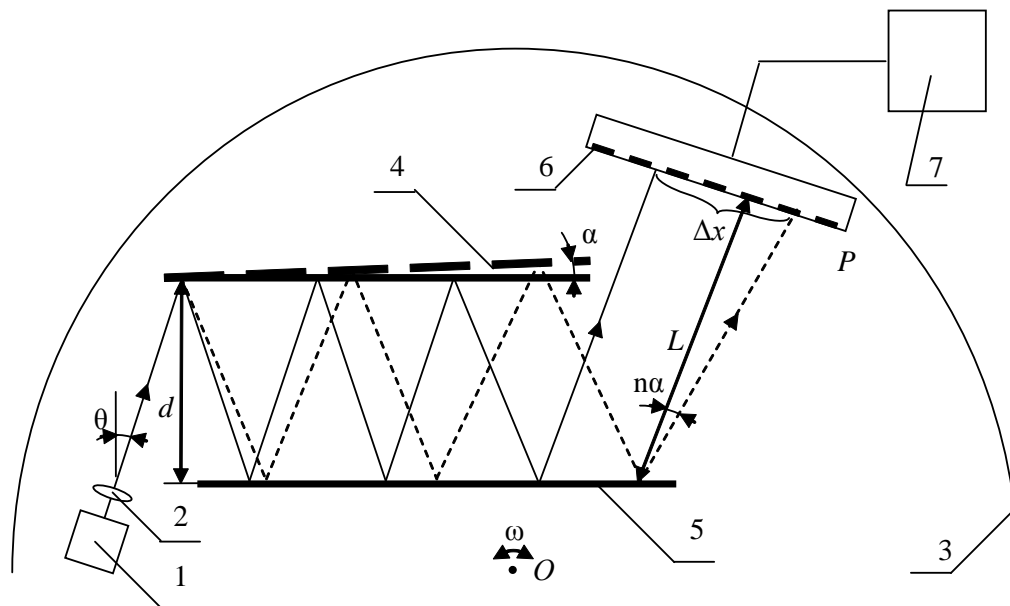


Рис. 7. Схема устройства для измерения угловой скорости вращения: 1 – источник света, 2 – объектив, 3 – вращающееся основание, 4 – подвижное зеркало, 5 – неподвижное зеркало, 6 – фотоприемник, 7 – блок обработки данных

Принцип действия основан на измерении изменения положения светового луча на поверхности ПЧФП, обусловленного смещением луча, отраженного подвижным массивным зеркалом, поворачивающимся под действием центробежной силы, при этом угол отклонения луча увеличивают за счет многократного прохождения этого луча в зеркальном умножителе (рис. 7). Выходной луч зеркального умножителя направляют на поверхность фотоприемника, который регистрирует положение пятна на светочувствительной поверхности. Затем выходной сигнал подают на цифровой осциллограф и обрабатывают с помощью ПК. В результате регистрируют изменение напряжения на выходе фотоприемника, связанное с изменением положения луча на поверхности фотоприемника.

Угловая скорость вращения определяется по формуле (9). Величину угла α можно вычислить из зависимости смещения луча по поверхности фотоприемника от угла отклонения зеркала:

$$\Delta x = d \cos(\theta + \alpha) \cos \theta \sum_{n=1}^N \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta + 2(n-1)\alpha) + \operatorname{tg}(\theta + 2n\alpha)}{\cos(\theta + (2n-1)\alpha)} \right] - 2Nd \sin \theta + L \cdot \operatorname{tg}(2N\alpha) ,$$

где N – число пар отражений, L – расстояние от точки последнего отражения пучка света от неподвижного зеркала до поверхности ПЧФП. В расчете принимается, что луч света падает на поворотное зеркало в точке, лежащей на оси вращения зеркала.

Выводы

Рассмотрено несколько вариантов искажений сигнала на выходе оптической системы, вносимых отклонением компонентов оптико-механических приборов от первоначального положения. Искажение выходного сигнала (изменение его положения или его фазы) можно использовать для определения характеристик движения в неинерциальных системах отсчета. Предложен способ измерения угловой скорости вращения, основанный на измерении изменения положения светового луча на поверхности ПЧФП, обусловленного смещением луча, отраженного подвижным массивным зеркалом, поворачивающимся под действием центробежной силы, при этом угол отклонения луча увеличивают за счет многократного прохождения этого луча в зеркальном множителе.

Литература

1. Водопьянов В.И., Савкин А.Н. Сопротивление материалов. Краткий курс, контрольные задания: Учебное пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 64 с.
2. Заявка на полезную модель № 2008140497 «Измеритель угловой скорости вращения» / Богатырева В.В., Дмитриев А.Л. – Приоритет от 13.10.2008.

Богатырева Валерия Владимировна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, carlo.01@mail.ru, carlo02@yandex.ru