

3. Опоры скольжения с газовой смазкой/Под ред. С. А. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1979.
4. Подшипники с газовой смазкой/Под ред. Н. С. Грессема, Дж. У. Пауэлла.— М.: Мир, 1966.

Поступила в редакцию 16 мая 1985 г.

УДК 681.7.067.54

И. Г. БРОНШТЕЙН, Э. М. ЛИВНИЦ

(Ленинград)

ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КВАРЦЕВОГО ГРАВИМЕТРА

В данной работе рассматривается оптический преобразователь морского гравиметра и анализируется влияние конструктивных параметров и aberrаций оптической системы на градуировочную характеристику преобразователя.

Функциональная схема преобразователя показана на рис. 1. В основу ее положен метод оптико-электронного преобразования измерения ускорения силы тяжести в числовую величину, который находит все большее применение в гравиметрии [1]. Первичным преобразователем ускорения силы тяжести в морском кварцевом гравиметре является двойная кварцевая упругая система 1. При изменении ускорения силы тяжести маятники 2, 3 упругой системы поворачивают жестко связанные с ними зеркала 4, 5. Для демпфирования действия возмущающих ускорений упругая система с зеркалами помещена в жидкость, которая по своим оптическим свойствам должна быть прозрачной, однородной и иметь определенный показатель преломления.

Преобразование угла поворота зеркал производится следующим образом [2]. Свет от источника 6, установленного непосредственно за щелевой диафрагмой 7, пройдя призму 8, поступает в объектив 9, который образует параллельный пучок лучей. После отражения от зеркал маятников и граней бипризмы 10 пучок света делится на четыре части, проходит тот же объектив в обратном направлении, а затем отражается светоделительной гранью призмы в сторону барабана 11. На поверхности барабана объектив формирует четыре изображения диафрагмы, которые располагаются попарно вдоль двух дорожек — траекторий целей 12 и 13. С одной из дорожек совмещены изображения от зеркала 5 маятника и грани бипризмы, которая показана на рис. 1 справа, а с другой — от зеркала 4 и грани бипризмы, приведенной слева.

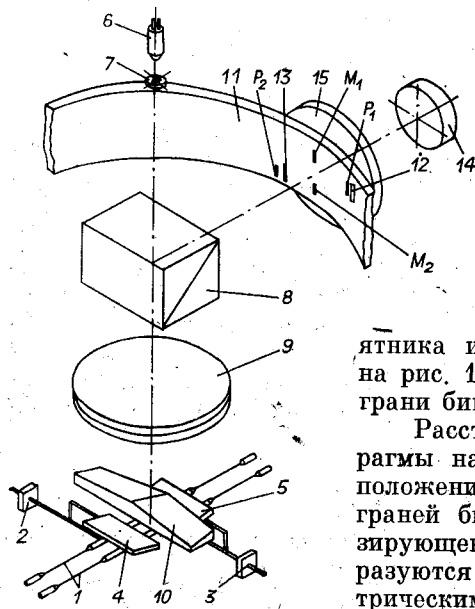


Рис. 1.

Расстояния между изображениями диафрагмы на дорожках являются мерой углового положения подвижных зеркал относительно граней бипризмы. Благодаря действию анализирующего устройства эти расстояния преобразуются во временные интервалы между электрическими импульсами. Для анализа изображения предназначены сканирующий барабан,

фотоприемник 14 и коллектив 15. Барабан укреплен на оси синхронного двигателя (на рис. 1 не показан), а фотоприемник и коллектив, служащий для равномерного освещения светочувствительной поверхности фотоприемника, установлены неподвижно. Преобразование временных интервалов в числовой код и ввод в ЭВМ производится устройством первичной обработки. По результатам измерений интервалов M_1P_1 и M_2P_2 находят угловое положение каждого из маятников, производят ориентирование и калибровку гравиметра, а по интервалу M_1M_2 , соответствующему суммарному отклонению маятников гравиметра, определяют составляющую погрешности измеряемой силы тяжести вследствие кросс-каплинг-эффекта [3].

Повышение стабильности показаний оптического преобразователя достигается введением поправки, определяемой по изменению временного интервала между реперными изображениями P_1 и P_2 . Этот интервал характеризует величину угла между лучами, отраженными от граней бипризмы. Изменение интервала свидетельствует об отклонении коэффициента преобразования оптического преобразователя [4], которое может привести к погрешности измерений.

Отклонение коэффициента преобразования возникает вследствие изменения скорости вращения двигателя, температурного изменения фокусного расстояния объектива, показателя преломления демпфирующей жидкости, размеров сканирующего барабана, а также тубуса объектива. Оно существенно зависит и от распределения освещенности в пространстве изображения. При изменении функции распределения освещенности, а следовательно, качества изображения целевой диафрагмы изменяется интервал между импульсами, соответствующий измеряемому углу поворота маятников [5, 6].

С целью расширения диапазона измерения в разработанном оптическом преобразователе предусмотрено сканирование по двум дорожкам [2]. Оно позволяет повысить информационную пропускную способность преобразователя, не увеличивая угловое поле объектива, и обеспечить измерение интервалов M_1P_1 , M_2P_2 и M_1M_2 . Метод расширения диапазона измерения без увеличения углового поля представляет интерес, так как при увеличении поля обычно снижается качество изображения и появляется метрическая дисторсия — нелинейность градуировочной характеристики.

Для получения зависимости градуировочной характеристики оптического преобразователя от конструктивных параметров и аберраций оптической системы найдем выражение для коэффициента преобразования. Его удобно представить в виде произведения

$$\dot{M} = M_1M_2M_3, \quad (1)$$

где M_1 — коэффициент преобразования угла θ поворота зеркала маятника в угол ω наклона пучка лучей в пространстве предметов (рис. 2):

$$M_1 = \omega/\theta; \quad (2)$$

M_2 — коэффициент преобразования угла ω в угол α' поворота сканирующего барабана:

$$M_2 = \alpha'/\omega; \quad (3)$$

M_3 — коэффициент преобразования угла поворота сканирующего барабана в числовой код:

$$M_3 = m/\alpha'. \quad (4)$$

Зависимость M_1 от параметров оптической системы нетрудно найти на основании закона преломления. Ограничиваясь двумя первыми членами разложения $\sin \omega$ в ряд Тейлора, получим

$$M_1 \approx 2n(1 - (1 - n^2)\omega^2/6n^2), \quad (5)$$

где n — коэффициент преломления демпфирующей жидкости.

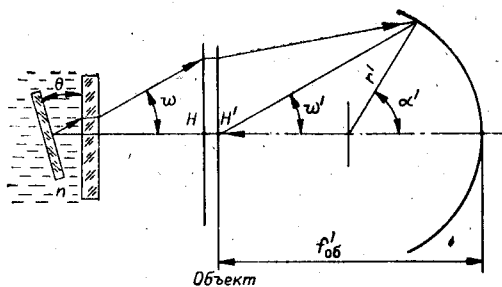


Рис. 2.

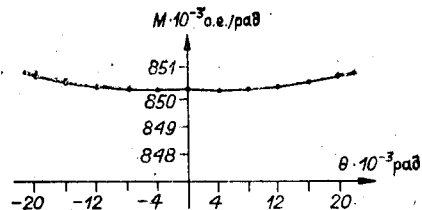


Рис. 3.

Коэффициент M_2 в функции от параметров преобразователя можно получить, рассматривая ход главных лучей в оптической системе. Учитывая, что поверхность изображения объектива представляет собой сферу радиусом, равным радиусу r' сканирующего барабана, а $\omega = \omega'$ и $f = f'$, имеем

$$\sin \alpha' / \sin \omega = (f/r' - (1 - \cos \alpha')) / \cos \omega. \quad (6)$$

На основании (6) нетрудно найти

$$M_2 = \alpha' / \omega = f/r' (1 + \omega^2/3 + \Delta y'/y'). \quad (7)$$

Величина y' изображения, которая выражается дугой радиусом r' , представляется в виде

$$y' = y'_0 + \Delta y'. \quad (8)$$

Здесь y'_0 — величина гауссового изображения; $\Delta y'$ — смещение реального изображения относительно гауссового:

$$\Delta y' = \Delta y'_a + \Delta y'_p, \quad (9)$$

где $\Delta y'_a$ — смещение изображения, возникающее вследствие аберраций; $\Delta y'_p$ — смещение, обусловленное расфокусировкой.

Коэффициент M_3 зависит от метода преобразования угла поворота анализирующих щелей в числовой код. Для времяимпульсного метода, который используется при анализе изображения, сформированного оптической системой преобразователя, имеем

$$M_3 = m/\alpha' = T_{щ}/2\pi T_r \quad (10)$$

($T_{щ}$ — период вращения анализирующих щелей; T_r — период следования импульсов генератора стабильной частоты).

На основании (5), (7), (10) выражение для M представим в виде

$$M = fnT_{щ} (1 - (1 - 3n^2\omega^2)/6n^2 + \Delta y'/y') / \pi r' T_r. \quad (11)$$

Из (11) следует, что при полной компенсации нелинейности преобразования в жидкостном клине и анализирующем устройстве аберрациями оптической системы

$$(1 - 3n^2)\omega^2/6n^2 = \Delta y'/y'. \quad (12)$$

Тогда

$$M = M_0 = fnT_{щ}/\pi r' T_r. \quad (13)$$

Таким образом, выполнение условия (12) приводит функцию (11) к линейному виду. Если при этом конструктивные параметры преобразователя будут сохраняться неизменными во всем диапазоне измерений, то коэффициент преобразования станет постоянным.

На рис. 3 представлена градуировочная характеристика, вычисленная по функциональной зависимости (11) для оптического преобразователя, со следующими параметрами: $f = 150$ мм, $n = 1,395$, $T_{щ} = 6,25$ Гц, $T_r = 4$ МГц, $r' = 50$ мм. При этом значение $\Delta y'/y'$ получено расчетом

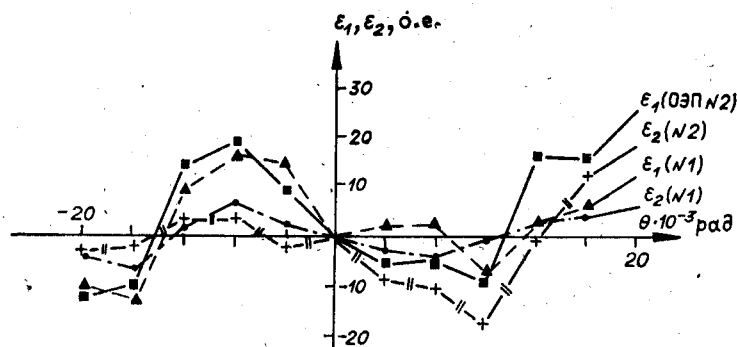


Рис. 4.

аббераций оптической системы преобразователя при заданных величинах децентровки входных зрачков и параметрах траекторий движения анализирующих щелей. Из приведенного графика следует, что градуировочную характеристику можно с достаточной степенью точности (до 0,01%) аппроксимировать выражением вида

$$M = M_0 + K|\theta|. \quad (14)$$

В результате экспериментальных исследований указанных преобразователей установлено, что действительное значение коэффициента M отличается от расчетного на 0,6%, а расхождение оценок коэффициентов M для двух образцов преобразователей, параметры которых укладываются в пределы, установленные допусками на изготовление, не превышает 0,1%. На основании данных экспериментов методом наименьших квадратов получена функциональная зависимость коэффициента $M = F(\theta)$ во всем диапазоне измерений, произведена оценка отсчетов угла поворота зеркал маятников для первой и второй дорожек и найдены зависимости $\epsilon_1 = \Phi_1(\theta)$ и $\epsilon_2 = \Phi_2(\theta)$, где ϵ_1 и ϵ_2 — отклонения показаний на первой и второй дорожках в функции от угла поворота маятников (рис. 4).

Учитывая, что испытательная установка и методика исследований обеспечивают возможность определения M со средней квадратической погрешностью 0,002%, можно сделать вывод, что функции для ϵ_1 и ϵ_2 у обоих преобразователей имеют одинаковый характер. Небольшие расхождения между ними обусловлены метрической дисторсией реальных оптических систем, которая учитывает полученные из расчета оптической системы остаточные aberrации и возникшие в результате погрешностей изготовления преобразователя технологические aberrации.

Выяснено также, что вследствие неточной ориентации преобразователя относительно упругой системы гравиметра появляется расхождение коэффициентов преобразования для двух дорожек. Оно связано с различным положением автоколлимационных бликов относительно оптической системы в направлении, перпендикулярном сканированию.

Таким образом, для полного исключения погрешностей гравиметра следует обеспечить также постоянство элементов внутреннего ориентирования преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е. И. Морской гиросtabilизаторный гравиметр и его работа.— М.: Наука, 1972.
2. А. с. 953609 (СССР). Кварцевый гравиметр/В. В. Аксенов и др.— Оpubл. в Б. И., 1982, № 31.
3. Огородова Л. В. и др. Гравиметрия.— М.: Наука, 1978.
4. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения.

5. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов.— Л.: Машиностроение, 1977.
6. Порфирьев Л. Ф. Теория оптико-электронных приборов и систем.— Л.: Машиностроение, 1980.

Поступила в редакцию 14 февраля 1985 г.

УДК 621.373.826 : 621.396

Ю. П. УДОЕВ

(Ленинград)

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Характеристики планарных оптических волноводов (ПОВ) (профиль $n_f(z)$ показателя преломления в случае градиентных ПОВ или показатель преломления n_f и толщина h тонкопленочного несущего слоя)* обычно находят путем математической обработки экспериментальных данных по модовому составу [1—4]. В [5] предложен аналогичный по процедуре обработки данных, но более простой в экспериментальном плане метод исследования ПОВ, основанный на анализе интерференционной картины, возникающей в отраженном свете при освещении ПОВ со стороны несущего слоя системой расходящихся световых волн в области полного внутреннего отражения (ПВО) от подложки волновода. На первый взгляд такая схема наблюдений не может быть полезной, поскольку, например, из энергетических соображений следует, что при всех углах падения, превышающих критический угол ПВО от подложки тонкопленочного волновода, энергетический коэффициент отражения должен быть равен 1. В настоящей работе рассмотрены причины появления интерференционной картины при таких условиях освещения реальных ПОВ и получены аналитические условия интерференционных минимумов, которые могут быть использованы для последующей обработки результатов измерения их углового положения.

1. Схема измерений по способу [5] показана на рис. 1, а. Волновод находится в оптическом контакте с рабочей гранью призмы. Входная грань призмы выполнена матовой и освещена достаточно произвольным по геометрии и поляризации пучком квазимонохроматического излучения. За выходной гранью призмы располагается поляризатор и объектив, в фокальной плоскости которого исследуется распределение интенсивности излучения, отраженного от ПОВ. Для определенности будем предполагать, что поляризатор выделяет ТЕ-волны. Показатель преломления призмы $n_p > n_f$, поэтому существует узкий диапазон углов падения

$$\varphi^* = \arcsin(n_s/n_p) < \varphi < \varphi^f = \arcsin(n_f/n_p), \quad (1)$$

при котором возникает ПВО на границе несущий слой — подложка, но отражение от границы призма — несущий слой еще не является полным. Экспериментально было найдено, что в диапазоне (1) в фокальной плоскости имеется система узких темных линий (рис. 1, б), число которых равно числу мод волновода, а величины $n_m = n_p \sin \varphi_m$ (φ_m — величина угла падения, при котором наблюдается минимум m) близки к значениям эффективных показателей преломления N_m направляемых мод свободного ПОВ.

* В данной работе предполагается, что функции покровного слоя выполняет воздушная среда.