



различного размера и то, что микросферы кремнезема являются полыми в центре.

Литература

1. Баженов А.В., Горбунов А.В., Алдушин К.А. оптические свойства тонких пленок из плотноупакованных SiO₂-сфер: Физика твердого тела, том 44 вып.6, 2002.-1026 с.
2. Крылова Т.Н., Бохонская И.Ф., Карапетян Г.А. Измерение прозрачных пленок на поверхности стекла эллипсометрическим и спектрофотометрическим методами// Опт. и спектр. – 1980, т.49,вып.4.,стр.802-808.

О.А. Заякин

МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИИ, ВЫВОД ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОЙ ОПТИКИ

(Самарский государственный аэрокосмический университет)

В современной индустрии довольно широко применяются методы триангуляции для контроля и измерений геометрических величин. Все усложняющиеся оптические схемы, связанные с применением структурированного освещения, значительно затрудняют вывод функции преобразования. Традиционно эта операция делается с помощью геометрии [1] (у автора есть русский перевод). Это создает сложности при формализации подхода для автоматизации получения искомой функции преобразования [2]. Использование алгебраических методов позволяет преодолеть эти трудности. Однако в инженерной практике эти методы в ряде случаев применять затруднительно из-за недостаточной методической разработки. Как правило, функция преобразования в публикациях приводится без вывода, важные сопутствующие условия также опускаются. Данная работа призвана в какой-то степени помочь в этом деле.

Как принято в оптической триангуляции, наш вывод основан на законах геометрической оптики, при допущении, что и падающий, и отраженный пучки света являются тонкими [3], с. 168. Это означает, что их поперечная ширина не учитывается. В этом случае ход лучей полностью описывается ходом центрального луча, называемого также главной оптической осью пучка.

Рассмотрим оптическую схему триангулятора (см. рис. 1). Пучок света сначала фокусируется источником излучения 1 на контролируемую поверхность 2. Примем, что высота h освещенного локального (точечного) участка контролируемой поверхности отсчитыва-

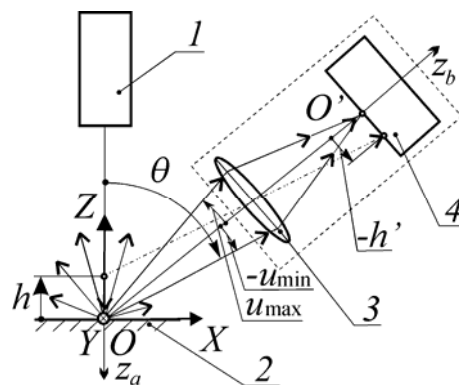


Рис. 1. Схема триангулятора



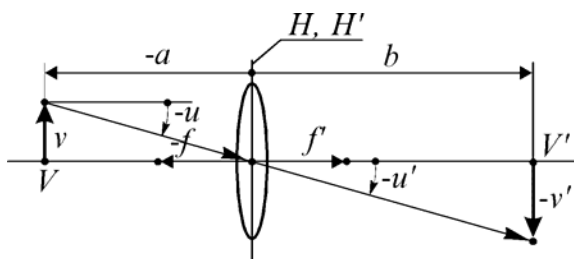
ется против главной оптической оси z_a источника излучения. Затем часть света, рассеиваемого контролируемо поверхностью 2, попадает в объектив 3 приемной оптической системы 3, 4. Угол наклона главной оптической оси z_b этой системы относительно оси «минус z_a » обозначим как θ .

Для описания координат освещенной точки контролируемой поверхности выберем систему декартовых координат XYZ . Расположим ее в точке $h=0$, ориентируем, как на рис. 1.

Полагаем, что главная оптическая ось объектива 3 проходит через освещенную точку поверхности 2 при $h=0$. Далее, при нашем выводе используем тот известный факт, что луч, лежащий в главном оптическом сечении объектива (то есть плоскости, проходящей через его главную оптическую ось), после прохождения этого объектива остается в том же сечении.

Для расчета воспользуемся известным способом Гаусса [4] – родоначальника матричной оптики. Ход лучей рассмотрим в плоскости, проходящем через главную оптическую ось (см. рис. 2). Расстояние от точки, через которую проходит луч, до главной оптической оси, обозначим как v . Обозначим угол наклона лучей как u (в радианах).

Освещенная точка поверхности 2 находится в пространстве предметов, а фотоприемник 4 – в пространстве изображений объектива 3. При этом точки предмета и изображения не являются, в общем случае, сопряженными. Для нахождения искомой функции преобразования воспользуемся выражением [4], с. 343, связывающим параметры падающего и отраженного лучей в двух произвольных поперечных сечениях, то есть, в плоскостях, перпендикулярных главной оптической оси.



(VV') - главная оптическая ось; H , H' - главные плоскости линзы, передняя и задняя

Рис. 1 – К выводу матрицы преобразования лучей

преобразований: прохождения луча в пространстве от исходной точки до линзы, преломление линзой, прохождение луча от линзы дальше, до конечной точки (см. [5], с. 156). Матрица результирующего преобразования равна произведению матриц составляющих его последовательных преобразований, взятых в обратном порядке:

Приведем вывод этого выражения.

Матричная формула преобразования луча линзой записывается в общем виде так:

$$\begin{pmatrix} v' \\ u' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В (2) и далее штрихом обозначены параметры луча после преобразования в объективе 3.

Преобразование луча в линзе представлено как последовательность трех



$$M = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где a - расстояние от начальной точки до линзы; b - расстояние от конечной точки до линзы; f' - заднее фокусное расстояние линзы.

Отметим, что в паракиальном приближении практически выполняются упрощенные формулы, связывающие линейные и угловые величины, подобные следующим:

$$u = \frac{v}{a}, \quad u' = \frac{v'}{b}.$$

Отсчет положительных величин a и b идет в направлении луча света вдоль главной оптической оси (см. рис. 2), в соответствии с принятым правилом знаков лучевой оптики. При этом за начало отсчета принимаем главные плоскости линзы, переднюю H - для a и заднюю H' - для b . Примем, что переднее фокусное расстояние собирающей линзы отрицательно, а заднее – положительно. Укажем, что если среда вокруг линзы однородна, то $f = -f'$.

После перемножения матриц в (3) получаем:

$$M = \begin{pmatrix} 1 - \frac{b}{f'} & a - \frac{ab}{f'} + b \\ -\frac{1}{f'} & 1 - \frac{a}{f'} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получаем для v' следующее выражение:

$$v' = \left(1 - \frac{b}{f'}\right) \cdot v + \left(a - \frac{ab}{f'} + b\right) \cdot u, \quad (5)$$

где v - отклонение точки падения луча на фотоприемник от точки пересечения фотоприемника главной оптической осью.

Мы настраиваем свою оптическую схему (рис. 1) так, что при $h=0$ точки в пространстве предметов и пространстве изображений были оптически сопряженными. Тогда, при $h=0$, в (5) зависимости от углов нет (это свойство любой линзы или объектива в выбранном нами приближении) и множитель при u в (5) равен нулю.

Переходя к системе координат из рис. 1, получаем при малых h :

$$h \cong \frac{f'}{(f'-b) \sin \theta} h'. \quad (6)$$

Отрицательный множитель при h' получается, потому что изображение объектив дает перевернутое.

Из (5) видно, что даже в использованном нами физическом приближении при $h \neq 0$ точка не изображается точкой, а получается пятно. Это является од-



ним из источников методической погрешности метода триангуляции. Тогда из (5) получаем для функции преобразования:

$$h = \frac{h' \left[a_0 \left(1 - \frac{b}{f'} \right) + b \right] u}{\left(1 - \frac{b}{f'} \right) (\sin \theta - u \cos \theta)}. \quad (7)$$

Для оценки нелинейности функции (7) можно предположить, что имеет место симметричный диапазон $[-u_{\max}, u_{\max}]$, и он находится в пределах параксиального приближения, то есть для него можно считать, что $\operatorname{tg} u = u$. Также можно считать распределение мощности света, попадающего на объектив 2, равномерным.

Перепишем (7) в виде, похожим на полином 1-й степени:

$$h = \frac{1}{\left(1 - \frac{b}{f'} \right) (\sin \theta - u \cos \theta)} h' - \frac{\left[a_0 \left(1 - \frac{b}{f'} \right) + b \right] u}{\left(1 - \frac{b}{f'} \right) (\sin \theta - u \cos \theta)}. \quad (8)$$

Тогда при сделанных нами предположениях функция (8) остается линейной относительно h' . Отсюда очевидно, что вклад в нелинейность дает возникающая при $h \neq 0$ несимметричность диапазона углов u , как следствие отклонения предметной точки от главной оптической оси. Следует также учесть и закон Ламберта, согласно которому распределение мощности рассеянного света от поверхности пропорционально $\cos \theta$, хотя это влияет в гораздо меньшей степени, чем первый из названных факторов.

Из (8) также видно, что функция преобразования сохраняет линейность в широком диапазоне оптических увеличений, определяемом, в нашей схеме, отношением b/f' . Это, заметим, записано при условии, что b оптически сопряженная с a_0 при $h = 0$.

Итак, приведен вывод функции преобразования триангулятора на основе приближения геометрической оптики и гауссовых тонких пучков с использованием формул матричной оптики. Показано, что она имеет практически линейный вид во всем диапазоне оптических увеличений изображающего объектива, а также при малом относительном отверстии этого объектива, при котором пучок света, попадающий в него, является параксиальным.

Литература

1. Schmidt, K. Berührungslöse Optisch Längen- und Abstandsmessung mit Hilfe des Triangulationsverfahrens = Бесконтактные оптические измерения длины и расстояния с помощью триангуляционных методов // Feingerätetechnik. - 1988. - 37, No. 4. - P. 170 - 172. - (Нем.).



2. Буцких, В. А. Методы обработки видеоинформации на основе алгоритмов слепой идентификации в системах с лазерными триангуляционными измерителями [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.12.13: защищена 14.12.2012: / Буцких Виктор Александрович [Место защиты: Поволж. гос. акад. телекоммуникаций и информатики]. – Самара, 2012. – 152 с.

3. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. - Изд. 2-е. - М.: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1973. - 720 с.

4. Бутиков, Е. И. Оптика [Текст]: учеб. пособие для вузов / Е. И. Бутиков; под ред. Н. И. Калитеевского. – М.: Высш. шк., 1986. – 512 с.

5. Хаус, Х. Волны и поля в оптоэлектронике [Текст] / Х. Хаус; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 432 с.

Э.А. Кильметов

ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

1. Введение

На сегодняшний день, задача регистрации параметров ГМВ частично решается посредством сети *магнитных обсерваторий* – научных учреждений, в которых производятся параметрические наблюдения магнитосферы Земли и необходимые для них астрономические. Зарегистрированные данные по состоянию магнитного поля и ионосферы в свою очередь регулярно направляются в Международные центры, которые находятся в России, США, Дании и Японии, где они тщательно изучаются, обрабатываются и в некоторых случаях становятся доступными широкой аудитории с известным запаздыванием.

2. Моделирование, расчет и построение сенсорного модуля магнитометрической гис

В случае приложения внешнего (исследуемого) магнитного поля H , к отдельно взятому АМР-элементу, поле поворачивает вектор намагниченности тонкой магнитной пленки на угол β . Значение β зависит от направления и величины H , при этом сопротивление пермаллоевой пленки оценивается согласно выражению (1), при условии, что $H \ll H_0$, где H_0 – подмагничивающее поле[2].

$$R = R_{B=0} + \Delta R \left(1 - \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \right) = R_{B=0} + \Delta R \cdot \cos^2 \beta, \quad (1)$$

где $R_{B=0}$ – сопротивление пермаллоевой пленки вне действия магнитного поля; ΔR – максимально возможное изменение сопротивления ($R_{B=0}=3.8-4.2\%$); $\sin \beta = H/H_0$.

Из выражения (1) легко заметить, что сопротивление АМР-элемента квадратично зависит от слагаемого (H/H_0) при $H_0 = \text{const}$. Такая квадратичная