

УДК 539.37 : 681.783.325.4

**В. А. Бабенко, В. Б. Константинов, В. М. Левушкин,
А. Ф. Малый, Д. Ф. Черных**

(Санкт-Петербург)

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ МУАРОВОЙ ТОПОГРАФИИ

Описана методика, разработанная для космического эксперимента «Знамя», позволяющая найти распределение и величину деформаций вращающегося солнечного отражателя. Приведен анализ муаровых картин, возникающих при наложении изображения нанесенных на исследуемый объект различных видов концентрических колец на тестовую систему полос, поступающую с бортовой телевизионной аппаратуры. Выбрано оптимальное решение, соответствующее техническим и экспериментальным характеристикам станции и приемопередающей аппаратуры.

Введение. С помощью отстыкованного от орбитальной станции «Мир» грузового транспортного корабля «Прогресс М-15» 4 февраля 1993 г. в открытом космосе на высоте 400 км был развернут пленочный диск – отражатель солнечного света диаметром 20 м. Цель нашей работы – рассмотрение возможности измерения деформаций вращающегося экрана («паруса») методом муаровой топографии. Принцип измерения заключается в сравнении зарегистрированного эталонного изображения теста с изображением теста, наложенного на поверхность контролируемого изделия.

Метод муаровой топографии. Для построения топограммы поверхности используются самые разные методы: стереограмметрия, лазерная дальнометрия, голография, телевидение с проведением съемки с разных направлений, муаровая топография. Метод муаровой топографии является одним из самых простых и эффективных [1–5]. Сущность метода заключается в использовании для измерений муаровой картины, которая возникает при наложении двух периодических структур – решеток, нанесенных на прозрачную основу и освещаемых некогерентным светом. Рассмотрим пропускание системы из двух решеток с одинаковым периодом и с равной шириной светлых и темных полос. При точном их совмещении, когда темная полоса попадает на светлую, пропускание системы становится нулевым. Сдвиг одной решетки относительно другой на ширину штриха в перпендикулярном линиям направлении позволяет системе пропускать столько же света, сколько пропускает каждая решетка по отдельности. Такой же сдвиг решетки на половину периода дает половину светового потока, а при монотонном смещении одной

решетки относительно другой наблюдается периодическое изменение пропускания системы. Визуально наблюдая это изменение, можно измерить перемещение одной решетки относительно другой. Точность измерения определяется периодом решетки.

Небольшой поворот одной решетки относительно другой приведет к появлению муаровых полос, которые при малых углах поворота почти перпендикулярны штрихам решетки. Период муаровых полос оказывается много больше (а частота соответственно много меньше) периода полос решетки. Если смещать одну решетку относительно другой в направлении, перпендикулярном штрихам решетки, то муаровые полосы также будут перемещаться в направлении, почти перпендикулярном направлению движения решетки, таким образом, что сдвиг решетки на расстояние, равное периоду решетки, приведет к смещению муаровой полосы на расстояние, равное периоду муаровых полос. Регистрация смещения муаровых полос фотоприемником реализуется значительно проще, чем регистрация движения самой решетки с высокой пространственной частотой.

Период муаровых полос связан с углом поворота одной решетки относительно другой. Поэтому, измеряя период муаровых полос, можно с высокой степенью точности измерять и угол поворота. Поскольку выходным сигналом системы является изображение, изменяющееся в реальном времени, то наблюдение оператором муаровых полос позволяет контролировать смещение и поворот одной решетки относительно другой. Точность визуального и приборного контроля определяется периодом решетки.

Если одну из решеток нанести или оптическим способом спроектировать на неплоскую поверхность, а затем изображение с этой поверхности сформировать в плоскости, где установлена эталонная решетка, то оператор увидит картину муаровых полос, отражающую локальные сдвиги объектной решетки относительно эталонной. Наблюдаемая муаровая картина будет содержать информацию о рельефе поверхности, которая может быть получена путем расчетов.

Таким образом, в методе муара деформированное состояние поверхности, связанное с изменением ее рельефа, характеризуется решеткой, нанесенной или спроектированной на объект. Для того чтобы определить соответствующее искажение геометрии объектной решетки, вводится опорная или эталонная решетка. Муаровая картина формируется в плоскости изображения системы наблюдения.

Чтобы оценить смещение или растяжение объекта, необходимо знать соотношение параметров между объектной решеткой, эталонной решеткой, профилем исследуемой поверхности и системой наблюдения. В нашем случае объектную решетку требовалось нанести на вращающийся пленочный диск толщиной 500 мкм, при этом она деформировалась вместе с материалом диска. Бортовая телевизионная система передает изображение части «паруса» с решеткой, а эталонная решетка на приемной стороне обеспечивает проведение требуемых измерений.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать объектную решетку с требуемыми параметрами, согласованными с параметрами предложенной к использованию телевизионной системы; выбрать способ наложения эталонной решетки; разработать алгоритмы получения топограммы поверхности по регистрируемым муаровым картинам.

Выбор геометрического рисунка решетки, наносимой на объект. Поскольку объект исследования представляет собой вращающийся диск, то на-

несение на его поверхность решетки в виде параллельных прямых или радиальных линий не представляется возможным из-за смаза телевизионного изображения вследствие вращения диска, к тому же приводящего к уменьшению контраста передаваемого изображения, так как принимающий изображение прибор является системой с накоплением заряда. Поэтому рисунок, наносимый на диск, должен представлять собой систему концентрических окружностей.

На рис. 1 показана геометрия расположения диска и телевизионной камеры. Период решетки и требуемое число полос определяются разрешающей способностью телевизионной системы при заданном расстоянии от телевизионной камеры до точки наблюдения и углом наклона диска к направлению наблюдения.

В выходной плоскости системы, т. е. на выходном мониторе, где происходит наложение эталонной решетки, должно появиться изображение концентрических окружностей, представляющее собой объектную решетку. На этом изображении окружности должны иметь одинаковый период и ширину полос при требуемом положении диска и искажаться при его отклонениях и деформациях. Такое условие позволяет упростить визуальный режим оценки имеющихся искажений и их математический анализ.

При расчете параметров объектной решетки, т. е. пространственного периода и числа концентрических окружностей, необходимо учесть: разрешающую способность телевизионной системы; геометрию взаимного расположения диска и телекамеры; влияние искажения изображения решетки, возникающего из-за того, что плоскость диска и его изображения на видиконе телевизионной камеры располагаются под значительным углом друг к другу.

Выбор периода решетки. Размер изображения элемента объектной решетки (т. е. ширина ее белой или черной полосы), спроектированного на видикон ТВ-камеры, должен быть не менее одного элемента разрешения, а поскольку решетка имеет вид концентрических окружностей, то не менее ширины строки. Однако электронный луч, построчно считывающий изображение с экрана видикона, отклоняется зарядом, который образуется на светлом поле экрана, что приводит к уменьшению контраста выходного изображения и изменению интересующего нас размера элемента решетки. Таким образом, изображение элемента объектной решетки на экране видикона должно быть

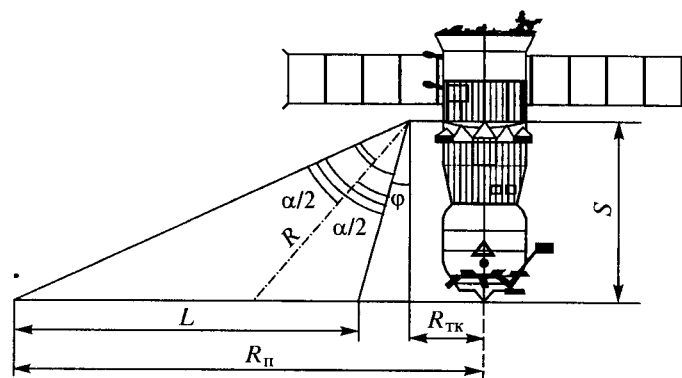


Рис. 1

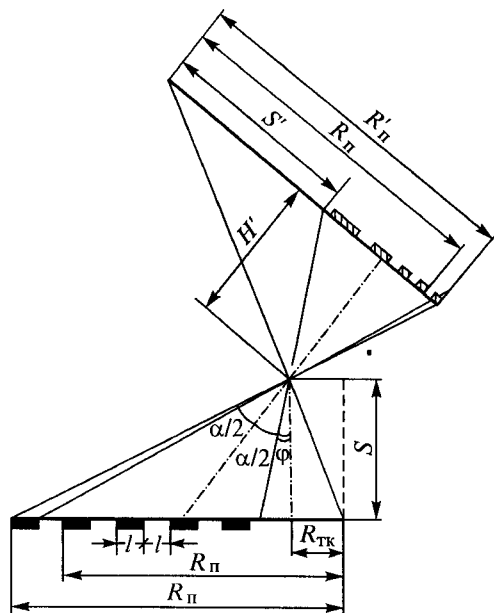


Рис. 2

не менее ширины двух строк и его должен давать самый отдаленный от экрана видикона участок «паруса».

Определение вида объектной решетки. Оценим масштабные искажения изображения concentрических колец, возникающие при проекции объектной решетки на экран видикона. Рассмотрим три случая.

1. Объектная решетка имеет вид эквидистантных concentрических колец шириной l (пространственный период $T = 2l$).

2. Объектная решетка такова, что при заданной геометрии расположения диска и ТВ-камеры изображение решетки на экране видикона представляет собой систему эквидистантных concentрических колец равной ширины.

3. Ширина колец на диске выбирается из условия равенства угловых размеров ширины колец объектной решетки, проектируемой на экран видикона.

Рассмотрим, как будет изменяться размер колец в изображении на видиконе для первого случая (рис. 2). Для удобства анализа предположим, что во всех трех предложенных вариантах изображение формируется в масштабе $1 : 1$. Тогда радиусы граничных окружностей колец в изображении, т. е. проекции радиусов колец объектной решетки, максимально отдаленные от ТВ-камеры, могут быть найдены по формуле

$$R_{п'} = [\text{tg}\{\arctg\{[R_{п} - R_{ТК} - l(k - n + 1)] : S\}\} H' + S', \quad (1)$$

где $R_{п}$ – радиус «паруса»; $R_{ТК}$ – расстояние от оси корабля «Прогресс» до места размещения ТВ-камеры; S – расстояние от плоскости «паруса» до места размещения ТВ-камеры; k – общее число колец на экране видикона (белых и черных); n – номер радиуса кольца от центра диска к периферии; H' – расстояние от главной плоскости объектива до плоскости изображения; S' – проекция минимального радиуса кольца объектной решетки.

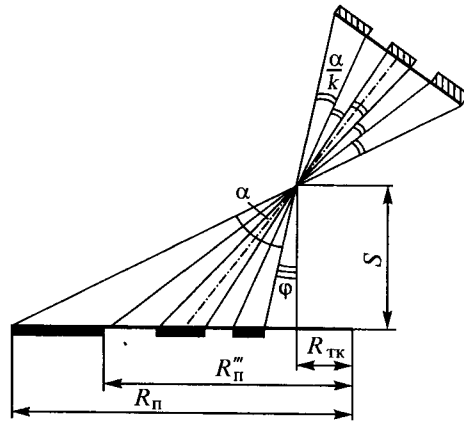


Рис. 3

Для второго случая определим, как должны изменяться радиусы граничных колец решетки на диске, чтобы обеспечить одинаковую ширину колец на экране видикона (рис. 3):

$$R_{П''} = S \operatorname{tg} \{ a/2 + \varphi - \operatorname{arctg} [\operatorname{tg} (a/2 \{ k/2 - n + 1 \}) : k/2] \} + R_{ТК}, \quad (2)$$

где a – угловое поле зрения ТВ-камеры.

Для третьего случая находим связь между изменениями радиусов колец на диске и радиусов колец изображения:

$$R_{П''} = [\operatorname{tg} (\varphi + a(n + 1)) : k] S + R_{ТК}. \quad (3)$$

Из рис. 1 видно, что поле ТВ-камеры захватывает только часть «паруса» (самый отдаленный его участок). Найдем ширину зоны захвата в направлении от центра «паруса» к его периферии:

$$L = R_{П} - R_{ТК} - S \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

Соответственно для первого случая $k = L : 1$.

Сравнение расчетных данных по указанным выше вариантам объектных решеток показало, что при имеющихся параметрах системы для объектных решеток, занимающих область по краю диска и имеющих радиус больше определенной величины, изменение периода колец в изображении незначительно, поэтому ширина полос и период могут быть одинаковыми. Объектные решетки с меньшими радиусами необходимо наносить на диск в соответствии с результатами расчетов для получения в изображении решетки с постоянным периодом.

Экспериментальная проверка возможности применения метода муаровой топографии. 1. *Макетирование в масштабе 1 : 1.* Для проверки наблюдаемости муаровой картины был собран макет в соответствии с геометрией системы, показанной на рис. 1. Объект, моделирующий «парус», представлял собой лист бумаги размером 2×2 м, на котором были нанесены линии шириной 4 см с расстоянием между ними также 4 см.

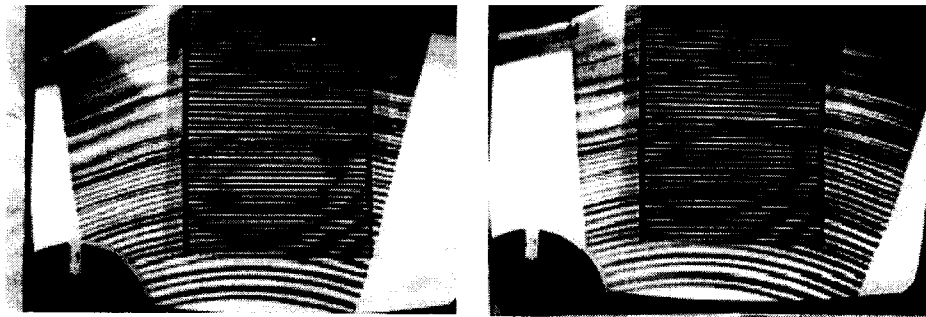


Рис. 4

С помощью ТВ-камеры КЛ-102 с объективом «МИР-29Т» изображение решетки воспроизводилось на экране ВКУ КЛ-10-04 и занимало на краю экрана зону порядка 2×2 см. На кинескоп накладывалась решетка с прямыми линиями, период которых совпадал с периодом линий в изображении. Муаровый эффект наблюдался отчетливо. Смещение или деформация плоскости объекта на величину порядка 5 см уверенно идентифицировалось по изменениям муаровой картины. Освещенность объекта составляла порядка 100 лк. Эксперимент показал возможность получения информации о деформациях неподвижного объекта.

2. *Макетирование в масштабе 1 : 20.* Для проверки наблюдаемости муаровой картины в случае вращающегося диска был создан макет вращающегося «паруса» в масштабе 1 : 20. На поверхность модели диска в его секторе была нанесена решетка в виде урезанных концентрических колец, чтобы показать возможность частичного контроля поверхности «паруса», если назначение поверхности «паруса» не позволяет осуществлять его полный контроль.

Изображение диска воспроизводилось с помощью ТВ-камеры КЛ-102 с объективом «МИР-291» и отображалось на ВКУ. На рис. 4, а приведена фотография муаровой картины, полученной при вращении диска, а на рис. 4, б – при неподвижном диске. Характер наблюдаемой картины совпадает с результатами компьютерного моделирования.

ВЫВОДЫ

Разработан метод контроля и оценки деформаций поверхностей на основе муаровой топографии с использованием стандартной телевизионной техники, имеющей определенный угол зрения, расстояние и наклон к исследуемой поверхности вращающегося космического отражателя. Произведен расчет геометрических параметров рисунка, который требуется нанести на поверхность «паруса» для осуществления измерений. Проведено физическое и компьютерное моделирование муаровых картин при различных наклонах «паруса». Оценена чувствительность метода.

Научно-исследовательская работа выполнена по заказу НПО «Энергия» (Москва) для космического эксперимента «Знамя» и инициирована проф. В. С. Сыромятниковым (технический руководитель) и Н. Н. Севастьяновым (генеральный директор консорциума «Космическая регата»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Koeze P.** A graphic method of predicting and constructing moire patterns // Optica Acta. 1982. 29, N 5. P. 595.
2. **Sciammarella C. A.** Holographic moire, an optical tool for the determination of displacements, strains, contours, and slopes of surfaces // Opt. Eng. 1982. 21, N 3. P. 447.
3. **Грабовский М., Кепрт Ж., Бартоняк Л.** Применение муаровой топографии для изучения геометрии рабочего колеса насоса // Тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования» «Гервикон-99» (Сумы, 1–10 сент. 1999 г.). Сумы: Сумский государственный университет, 1999. Т. 1. № 2.23.
4. **Сухарев И. П., Ушаков Б. Н.** Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. М.: Машиностроение, 1969.
5. **Шнейдерович Р. М., Левин О. А.** Измерение полей пластических деформаций методом муара. М.: Машиностроение, 1972.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,
E-mail: V.Konstantinov@pop.ioffe.rssi.ru*

*Поступила в редакцию
21 октября 2000 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!