

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 531.7.08, 535.8

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЗЕРКАЛА

© 2013 г. А. Н. Королёв *, доктор техн. наук; А. Я. Лукин **, канд. физ.-мат. наук;
Г. С. Полищук ***, канд. техн. наук

* ООО «Оптротех», Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург

*** Оптико-механическое объединение, Санкт-Петербург

E-mail: a.korolev@optrotech.ru

Обсуждается новая технология измерения динамической погрешности движения сканирующего зеркала, работающего в режиме строчно-кадровой развертки. Приведены результаты экспериментов, показывающих возможность измерения динамической погрешности углового движения зеркала с точностью на уровне 1".

Ключевые слова: сканирующее зеркало, светочувствительная матрица, погрешность измерения, модуляция излучения, динамическая погрешность углового движения.

Коды OCIS: 100.2000

Поступила в редакцию 20.02.2013

Статья посвящена проблеме измерения динамической погрешности углового движения сканирующего зеркала (разработка Специального конструкторского бюро космического приборостроения Института космических исследований Российской академии наук) с блоком строчно-кадровой развертки (БСКР), используемого в бортовых системах наблюдения Земли для развертки изображения относительно приемника излучения. Основная задача исследований состояла в оценке метрологических возможностей новой измерительной технологии. Поэтому в работе отражена только часть методических, вычислительных и пользовательских возможностей разработанного измерительного стенда.

Исходные параметры движения поворотного зеркала приведены в таблице.

Один полный цикл строчно-кадрового сканирования длится порядка 80 с. Очевидно, что выполнение измерений возможно только при

условии сохранения в памяти некоторой картины, отображающей процесс углового движения зеркала, с последующей ее обработкой.

Поэтому для измерения параметров движения сканирующего зеркала с блоком БСКР был разработан стенд, обеспечивающий регистрацию моментальных угловых положений зеркала в процессе его движения в виде изображений световых треков, формируемых на светочувствительной матрице фотоприемного устройства. Целью измерений является оценка динамической погрешности движения сканирующего зеркала, т.е. определение отклонения угловой координаты в каждой точке траектории от линейного (по шкале времени) закона углового движения.

Оптическая схема стенда (рис. 1) включает коллиматор 1 (от скамьи ОСК-2) с фокусным расстоянием 1600 мм, в фокусе которого расположена круглая диафрагма 2, освещаемая светодиодом 3, сканирующее зеркало 9 с при-

Параметры движения поворотного зеркала

Параметры	Значение
угол поворота зеркала в направлении оси строчной развертки с постоянной скоростью 0,0838 рад/с, град	$\pm 10,6$
длительность одного скана по строке, с	2,21
пошаговый поворот зеркала в направлении кадровой развертки, град	0,573
полный угол поворота при полном числе позиций по кадру, равном 35, град	19,5
направление движения для четных и нечетных строк противоположно по направлению	

водом 8 и цифровая фотокамера 7 (CANON EOS 5D Mark II с объективом CANON EF 85 mm f/1.8). Параллельный световой пучок на выходе коллиматора отражается от зеркала и попадает в объектив цифровой фотокамеры. В зависимости от угла поворота зеркала изображение излучателя фокусируется в определенную зону светочувствительной матрицы телевизионной камеры. Излучение светодиода модулируется с помощью генератора импульсов 4, который управляется от компьютера 5 посредством специальной программы и запускается импульсом начала строки развертки зеркала от блока БСКР 6. Компьютер

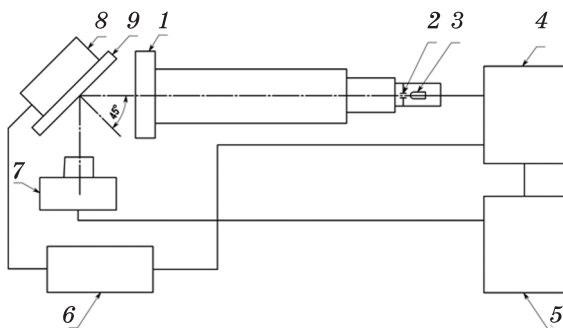


Рис. 1. Стенд измерения динамической погрешности углового движения сканирующего зеркала. Подробности в тексте.

обеспечивает программное управление всеми элементами стенда, включая блок строчно-кадровой развертки, фотокамеру и модулятор светодиода, а также выполняет анализ картины треков (в том числе серии изображений треков) для вычисления динамической погрешности и других параметров углового движения зеркала.

Диафрагма, установленная в фокальной плоскости коллиматора, имеет диаметр 3 мм. Размер изображения этой диафрагмы на матрице фотоприемника определяется увеличением системы $V = 85/1600 = 0,057^{\times}$, он равен 160 мкм. При размере пиксела 6,4 мкм диаметр изображения составляет 25 пикселей. Этот размер изображения круга является достаточным для определения координат его центра с точностью до сотых долей пиксела.

Предварительная калибровка фотоприемного устройства позволила определить калибровочный коэффициент $K = 15,797''/\text{пикс}$, определяющий цену 1 пиксела в угловых секундах. Измеренная дисторсия объектива на краю поля – 0,5%. С учетом калибровочного коэффициента получаем оценку дисторсии порядка 250".

На рис. 2 приведен пример изображения треков в форме матрицы изображений круглой диафрагмы. Положение каждого трека (пятна), формируемого фотоприемником, зависит от углового положения зеркала в момент формирования импульса модулятором. Размерность матрицы треков 50×26 – 50 отсчетов по строке, строк – 26. Длительность светового импульса в каждой точке составляет 50 мкс при временном интервале между точками 44 мс. Длительность импульса обеспечивает отсутствие смаза.

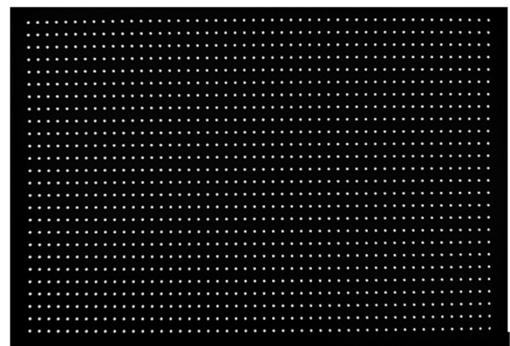


Рис. 2. Изображение картины треков в форме матрицы изображений круглой диафрагмы.

Длительности светового импульса 50 мкс при записи каждого трека (пятна) соответствует смаз размером 0,1 пиксела (0,6 мкм, или 1,5"). Все 1300 треков одинаково смазаны, что приводит к общему для всех треков смещению центра на половину размера смаза, т.е. на 0,3 мкм (0,75"). Этот незначительный общий сдвиг не влияет на результат измерения.

Предварительная обработка картины треков сводится к вычислению центра каждого изображения с разрешением до тысячных долей пиксела. Подобная задача была успешно решена авторами в работе [1].

В предположении линейности строчной и кадровой разверток, а также отсутствия пространственных искажений, изображения треков должны образовывать равномерную прямоугольную сетку с постоянными шагами по обеим координатам. Однако реальные искажения картины треков связаны с дисторсией объектива фотокамеры, ошибками волнового фронта испытываемого зеркала, а также с нелинейной зависимостью координаты от угла через функцию тангенса.

По результатам определения координат x , y центров всех 1300 треков (пятен) в пикселах программа обработки данных обеспечивает возможность вычисления следующих величин: координат центров в угловых секундах, отклонения dx и dy координат центров от идеальной сетки, динамической погрешности движения (для нечетных и четных строк) как остаток dx и dy после вычитания тренда, а также среднеквадратических отклонений (СКО) координат треков, определяемых по результатам многократных измерений.

Процедура вычисления этих величин следующая. Сначала по координатам треков в

центральной зоне (наименее искаженной дисторсией) вычисляются параметры (шаг по осям X и Y) "идеальной" решетки с фиксированным шагом, которую должны составлять треки при полном отсутствии любых искажений. Вычисляются координаты треков для идеальной решетки, а затем – отклонения dx и dy координат реальных треков от идеальных по осям X и Y .

На рис. 3а представлена картина векторов смещений реальных координат треков относительно решетки с фиксированным шагом. Векторы имеют 10-кратный масштаб по отношению к масштабу решетки. Рисунок показывает, что наблюдается глобальное дисторсионное искажение, которое описывается гладкой функцией.

Известна форма трапециевидных искажений раstra при использовании сканирующего плоского зеркала [2]. Эти искажения определяются зависимостью координаты от угла поворота зеркала через функцию тангенса. Расчеты показывают, что в рассматриваемом случае эти искажения и дисторсия объектива имеют противоположные знаки, что значительно уменьшает искажения. Поскольку точки на картине треков (рис. 2) формируются различными зонами зеркала, то отклонение от плоскостности зеркала также приводит к деформации раstra. Однако, авторы настоящей статьи не располагали сведениями о качестве поверхности сканирующего зеркала, и поэтому не было возможности оценить его вклад в искажения раstra.

Для вычисления динамической погрешности углового движения зеркала использовался метод вычитания тренда в форме одномерной степенной функции 3-го порядка для каждой строки или столбца. Поскольку эта функция является сечением поля дисторсии по направ-

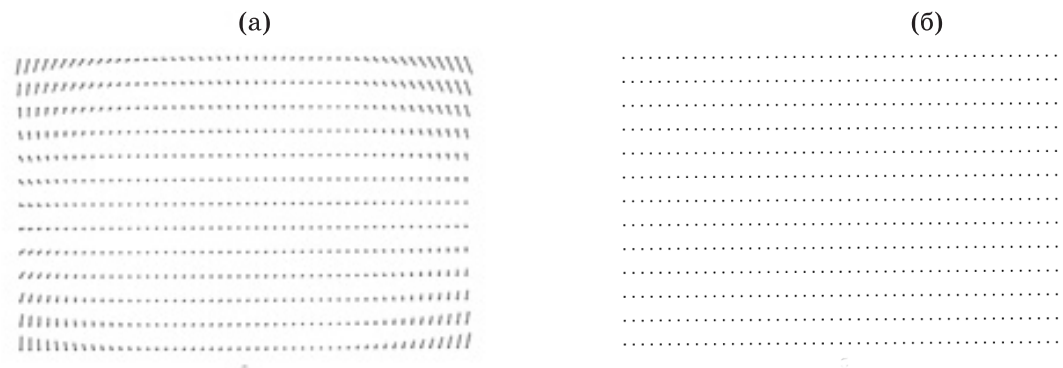


Рис. 3. Картины векторов смещений реальных координат треков относительно решетки с фиксированным шагом – исходная (а) и после выполнения процедуры коррекции глобальной функции дисторсии путем вычитания кубических трендов по строкам и столбцам (б).

лениям строк и столбцов, такой подход обеспечивает решение задачи коррекции дисторсионных искажений координат треков.

На рис. 3б приведена картина векторов смещений реальных координат треков после выполнения процедуры коррекции глобальной функции дисторсии путем вычитания кубических трендов по строкам и столбцам. При указанном для рис. 3а масштабе векторов здесь вообще незаметно наличие сдвигов координат из-за их малости.

Рассмотрим результаты измерений динамической погрешности для направлений вдоль оси X , т.е. по строкам. При исследовании погрешности по оси X совершенно справедливо разделить оценки нечетных и четных строк, так как их движение происходит в противоположных направлениях и реализация этих движений с помощью соответствующих приводов может иметь различную динамику. Погрешность каждой строки вычисляется путем вычитания тренда, описывающего сечение дисторсии на данной строке и соответствующего функции регрессии 3-го порядка, из совокупности значений координат треков x . Ограниченный размер статьи не позволяет привести графики для всей совокупности строк, подтверждающие высокую степень воспроизводимости динамической погрешности по строкам при существенно различной форме и величине тренда. Этот факт отражает корректность математической процедуры разделения глобальной функции дисторсии, которая в максимумах достигала $200''$, и искомой функции динамической погрешности.

На рис. 4 представлены графики среднего значения динамической погрешности нечетных и четных строк, полученные путем усреднения значений погрешности по столбцам.

Вычисление отклонений всех реализаций динамической погрешности от их средних значений по столбцам отдельно для нечетных и четных строк позволило получить общие по всей матрице значения СКО, которые как для нечетных так и для четных строк оказались близкими $\pm 0,5''$.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: значение динамической погрешности угловых движений исследованного образца сканирующего зеркала по оси X не превышает $\pm 10''$, ее функционалы различны для нечетных и четных строк и имеют высокую устойчивость для всех строк, попавших в область измерения.

При оценке СКО динамической погрешности, равного $\pm 0,5''$, полное значение погрешности (в предположении нормального



Рис. 4. Графики угловой динамической погрешности по X нечетных (1) и четных строк (2).

распределения) не должно превышать $\pm 1,5''$. Поскольку в это значение также вносит вклад в нестабильность угловых положений самого зеркала для различных треков по столбцам, то можно утверждать, что собственно погрешность измерения с использованием описанной технологии находится на уровне $1''$.

Полученные результаты измерения динамической погрешности и есть оценка нелинейности строчной развертки сканирующего зеркала. Для лучшего понимания полученных результатов считаем полезным предложить другую обобщенную оценку полученных отклонений от линейности, основанную на расчете угловых скоростей.

Из исходных данных следует, что скорость углового перемещения зеркала в направлении строчной развертки составляет $0,0838$ рад/с (или $4,8013$ °/с = 172845 "/с). Угловая скорость отраженного луча удваивается по отношению к угловой скорости зеркала и будет равна 34570 угл. с/с.

Графики динамической погрешности четных и нечетных строк в направлении строчной развертки (рис. 4) показывают, что ее размах не превышает $\pm 10''$, а максимальный перепад между точками (первые разности) не превышает $\pm 8''$. Это значение позволяет сделать оценку флуктуаций угловой скорости зеркала в процессе сканирования, которая соответствует $\pm 8/44 \times 10^3 = \pm 181''/с$.

Таким образом, относительные случайные флуктуации угловой скорости сканирующего зеркала не превышают $\pm 0,5\%$.

Если погрешность определения угловой координаты, равную $1''$, отнести также к временному интервалу между треками (44 мс), то получим оценку погрешности угловой скорости $\pm 1/44 \times 10^3 = \pm 23''/с$, следовательно, ее относительное значение составляет $\pm 0,07\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Королев А.Н., Лукин А.Я., Полищук Г.С.* Новая концепция измерения угла; модельные и экспериментальные исследования // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 6. С. 52–58.
 2. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: «Машиностроение», 1977. С. 50–53.
-