

А. А. СМЕХОВ, И. А. КОНЯХИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛУЧЕННОСТИ ВИНЬЕТИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматриваются особенности виньетирования в автоколлимационных системах и алгоритмические методы компенсации систематической погрешности, вызванной виньетированием; изложены принципы построения программной модели с использованием компьютерной симуляции.

Ключевые слова: автоколлимация, измерение углов поворота, компьютерное моделирование, погрешность виньетирования.

При монтаже и последующем мониторинговом наблюдении за функционированием крупногабаритных объектов требуется осуществлять контроль и измерение деформаций их элементов, вызванных как их собственным весом, так и влиянием внешних условий — порывами ветра или температурными изменениями.

Для контроля угловых деформаций эффективны автоколлимационные системы, включающие контрольный элемент — плоское зеркало, установленное на исследуемом объекте в точке деформации, и оптико-электронный автоколлиматор, установленный на жестком основании [1]. Излучение марки автоколлиматора, выполненной в виде малоразмерного оптического источника с диафрагмой, формируется объективом автоколлиматора в параллельный рабочий пучок лучей, падающий на плоское зеркало (рис. 1). После отражения рабочий пучок повторно проходит через объектив автоколлиматора и формирует изображение марки на чувствительной площадке анализатора, выполненного в виде матричного фотоприемника — ПЗС- или КМОП-матрицы. При угловом смещении (повороте) контрольного элемента вследствие деформации объекта отраженный пучок отклоняется от исходного направления, что приводит к соответствующему смещению изображения марки. В результате микропроцессорной обработки видеокadra измеряется величина смещения изображения марки, что позволяет определить угловое смещение контрольного элемента [1].

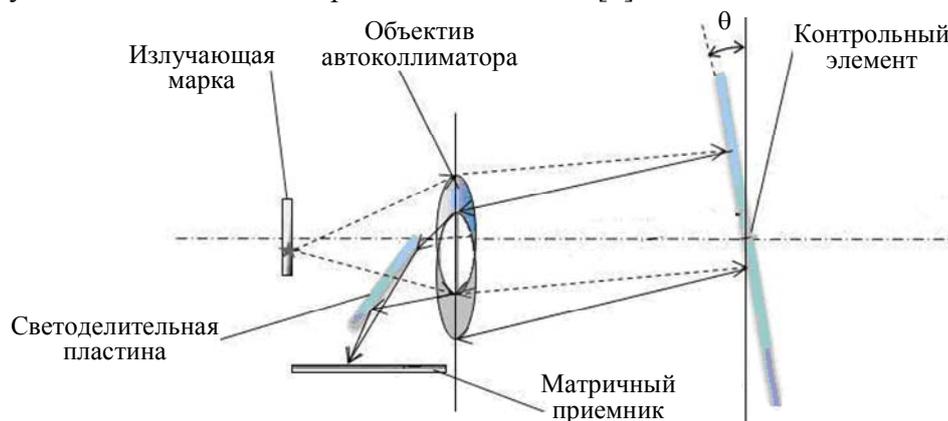


Рис. 1

Ограничение дистанции автоколлимационных измерений вследствие виньетирования. Дистанция от оптико-электронного автоколлиматора до контрольного элемента не превышает 2—3 м, что в значительной степени объясняется виньетированием отраженного рабочего пучка при прохождении через объектив автоколлиматора в случае углового смещения контрольного элемента [1].

Как показывает анализ, начиная с некоторой дистанции до контрольного элемента при его повороте на угол θ часть наклонного отраженного пучка „срезается“ (виньетируется) апертурой объектива, что приводит к нарушению симметричности формы распределения облученности в изображении марки, неточному измерению смещения его средневзвешенного энергетического центра и, соответственно, к погрешности измерения углового смещения контрольного элемента [1, 2].

Погрешность, вызванная виньетированием, является систематической, что определяет возможность ее компенсации и, следовательно, увеличения дистанции при измерении углов автоколлимационным методом.

Возникающая несимметричность распределения облученности сложным образом зависит как от величины углового смещения контрольного элемента, так и от соотношения апертур объектива и контрольного элемента и дистанции измерения [3].

Указанные обстоятельства затрудняют аналитические методы исследования погрешности вследствие виньетирования.

При известных параметрах элементов оптической схемы автоколлиматора и дистанции до контролируемого объекта для оценки величины погрешности измерения, вызванной виньетированием, и разработки алгоритма ее компенсации предлагается использовать компьютерную модель.

Принципы построения программной модели формирования виньетированного изображения. Детерминированное моделирование виньетированного изображения марки основано на найденной зависимости, согласно которой облученность в точке изображения пропорциональна интегралу по области перекрытия сечения отраженного пучка, формирующего изображение этой точки, апертурой объектива [4]: см. рис. 1. Формируемый объективом элементарный пучок, исходящий из точки излучающей марки (границы пучка изображены точками), после отражения от контрольного элемента (его апертура не ограничивает пучок), повернутого на угол θ (границы показаны сплошными линиями), формирует изображение точки марки на матричном приемнике. Облученность в точке изображения определяется (в относительных единицах) как отношение двух площадей: перекрытия сечения отраженного пучка апертурой объектива (незакрашенный эллипс) и самой апертуры объектива.

При работе программной модели вычисляется двумерное поле облученности на матричном фотоприемнике автоколлиматора. Каждая точка поля облученности определяется операторами, моделирующими прохождение элементарных пучков, формирующих облученность в этой точке изображения марки, через оптические элементы автоколлимационной системы (включая оператор пустого пространства). Также моделируются различные формы апертуры объектива и излучающей марки, учитывается диаграмма направленности излучения марки, что позволяет применять программную модель непосредственно в процессе проектирования автоколлимационной углоизмерительной системы. Модель разработана в технологии MatLab, оптимизированной для сложных вычислений с матричными данными.

В качестве примера на рис. 2, *а—г* приведено программное представление результатов моделирования распределения облученности изображения в случае излучающей марки крестообразной формы с постоянной яркостью и апертуры объектива квадратной формы (*а*). Графики (рис. 2, *б, в*) демонстрируют распределение облученности в двух ортогональных сечениях изображения: сечении, проходящем через центральную точку изображения (*в*), и сечении, где наибольшая облученность составляет 0,74 от величины облученности в центральной точке (*б*). На рис. 2, *г* в специальных полях показаны параметры автоколлимационной системы: задний фокальный отрезок и величина апертуры

объектива, половина размера излучающей марки, расстояние до точки формирования пучка автоколлиматора [2].

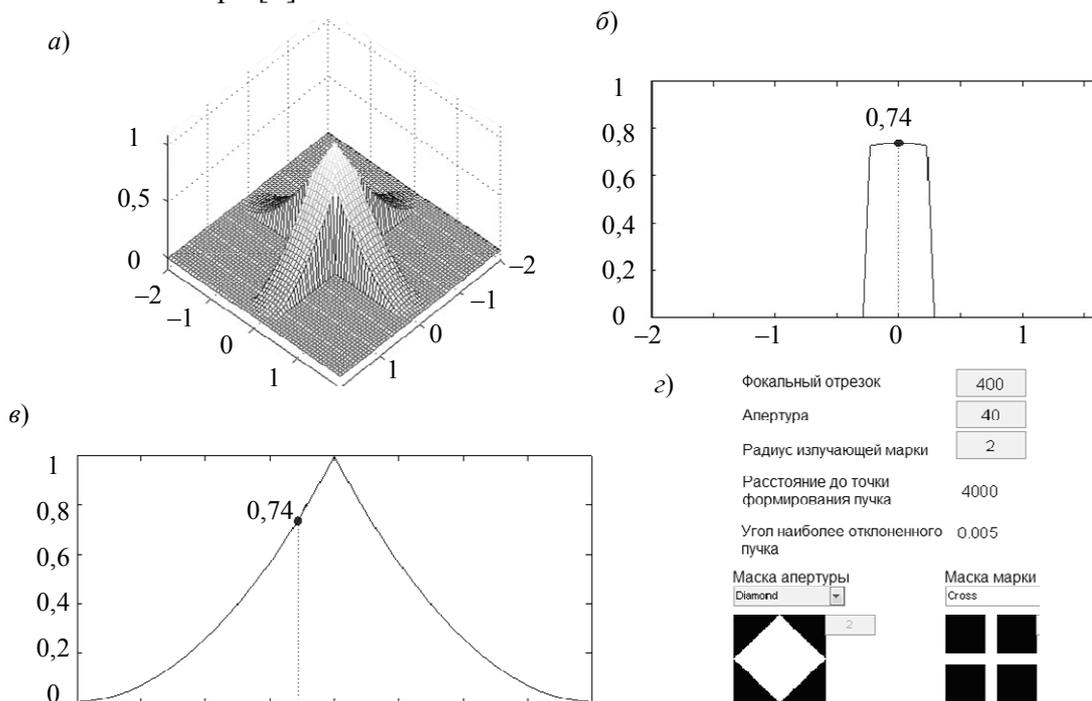


Рис. 2

Определение погрешности измерения углов с помощью программной модели. Разработанная программная модель виньетирования в автоколлимационной системе позволяет спрогнозировать несимметричность распределения облученности в изображении марки и определить зависимость возникающей погрешности измерения от величины углового смещения (поворота) контрольного элемента при известных габаритах оптических элементов автоколлиматора.

Полученная зависимость в табулированной форме запоминается в микропроцессорной системе обработки автоколлиматора и используется для вычисления истинного углового смещения контрольного элемента по измеренной величине.

Результаты расчета зависимости погрешности измерения (δx), вызванной виньетированием, от величины углового смещения (θ) контрольного элемента для автоколлимационной системы со следующими параметрами: фокусное расстояние объектива 250 мм, диаметр апертуры объектива 40 мм, диаметр зеркала 60 мм, диаметр марки (полупроводниковый излучающий диод) 1 мм, для двух различных дистанций (L) приведены на рис. 3.

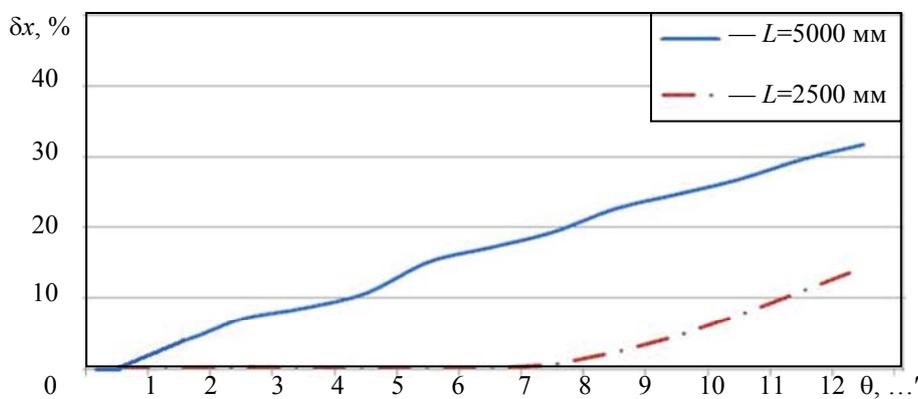


Рис. 3

Анализ рисунка показывает, что при $L=2500$ мм диапазон измерения угловых смещений при отсутствии погрешности, вызванной виньетированием, не превышает $7'$, а при $L=5000$ мм — $0,5'$.

При увеличении диапазона измерения на каждые 5' относительная погрешность возрастает соответственно на 10 %. Следовательно, на дистанции 5000 мм невозможны точные автоколлимационные измерения с относительной погрешностью, не превосходящей 5 %.

Использование полученной зависимости для коррекции измеренных значений угловых смещений позволяет увеличить диапазон измерения на каждой из рассмотренных дистанций до 12—15', что вполне достаточно для решения практических задач [3].

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных по федеральной целевой программе „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник / Ю. Б. Парвулюсов, С. А. Родионов, В. П. Солдатов и др.; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Логос, 2000. 488 с.
2. Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. М.: Недра, 1991.
1. Konyakhin I. A. Development of optoelectronic autocollimation devices for monitoring angular displacements // J. Opt. Technol. 2000. N 67. P. 344—348 [Электронный ресурс]: <<http://www.opticsinfobase.org/jot/abstract.cfm?URI=jot-67-4-344>>.
2. Konyakhin I. A., Polyakov V. M., Vorona A. M. Research on the methods to compensate the systematic error at optical autoreflection angular measurements // Intern. Symp. on Instrumentation Science and Technology: J. of Physics: Conference. 2006. Ser. 48. P. 932—936.

Сведения об авторах

Андрей Алексеевич Смехов

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: myfearismyblue@gmail.com

Игорь Алексеевич Коняхин

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.