

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ПУЧКА

RESEARCH OPTOELECTRONIC  
AUTOCOLLIMATOR FOR MEASURING  
THE ANGULAR DEFORMATION OF  
LARGE STRUCTURES WITH LIMITED  
WORKING BEAM

J. Li

A. Sakhariyanova

*Summary.* The construction features of autocollimation systems for measurement the large-sized and extended objects deformations at industry, power and scientific instrument making are considered. The conditions of increase of a distance of measurement are analyzed in comparison with the serial autocollimation devices. The error of measurement by the restriction of a working beam is investigated. The structure of algorithm for reduces the systematic error of the measurement which based on received analytical expression of function of an error is determined.

*Keywords:* autocollimator, vignetting, vignetting error, computer modelling, algorithm for reduce error.

Ли Женьпу

lirenpu@hotmail.com

Сахариянова Айганым Мараткызы

igalkon@hotmail.com

Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий,  
механики и оптики (Университет ИТМО)

*Аннотация.* Рассматриваются особенности построения автоколлимационных систем измерения деформаций крупногабаритных и протяжённых объектов промышленности, энергетики и научного приборостроения. Анализируются условия увеличения дистанции измерения по сравнению с серийными автоколлиматорами. Исследуется погрешность измерения вследствие ограничения рабочего пучка. Излагается структура алгоритма компенсации систематической погрешности измерения, основанного на полученном аналитическом выражении функции погрешности.

*Ключевые слова:* автоколлиматор, ограничение пучка, компьютерное моделирование, алгоритм компенсации.

## Введение

**М**етрологическое обеспечение монтажа и эксплуатации энергетических установок, крупногабаритных транспортных средств, установок для научных исследований требует точного контроля взаимного углового положения элементов их конструкции. Например, такие измерения обязательны при создании скоростных железнодорожных магистралей, радио- и телескопов, координатных стендов, ускорителей заряженных частиц [1,2,3,4].

Типичным примером является задача измерения угловых деформаций элементов опорно-поворотного устройства крупногабаритных (диаметр зеркала 70 метров) полноповоротных радиотелескопов как находящихся в эксплуатации (П-2500 Уссурийск, РТ-70 Евпатория), так и строящихся для работы в миллиметровом диапазоне длин волн (РТ-70 Суффа) [5,6]. Требуемые параметры углоизмерительной системы: рабочая дистанция до контролируемого элемента конструкции не менее 30 метров, диапазон измерения не менее  $\pm 5$  угл. мин., среднее квадратическое значение погрешности измерения не более 2 угл. сек.

Для указанных измерений эффективны оптико-электронные автоколлимационные углоизмерительные системы. Их преимуществом является отсутствие электрической связи с контролируемым объектом, на котором располагается малогабаритный отражатель в виде плоского зеркала [7].

Серийные оптико-электронные автоколлиматоры обеспечивают необходимую точность измерений, но имеют недостаточную во многих практических случаях рабочую дистанцию автоколлиматор-отражатель (до 10 метров) [8,9,10]. Одной из причин является нарастающая с увеличением дистанции погрешность вследствие ограничения (виньетирования) отражённого светового пучка.

Целью исследования является определение габаритных соотношений между оптическими элементами автоколлиматора и разработка алгоритма измерения, обеспечивающих уменьшение погрешности измерения вследствие ограничения рабочего пучка и, соответственно, увеличение рабочей дистанции.

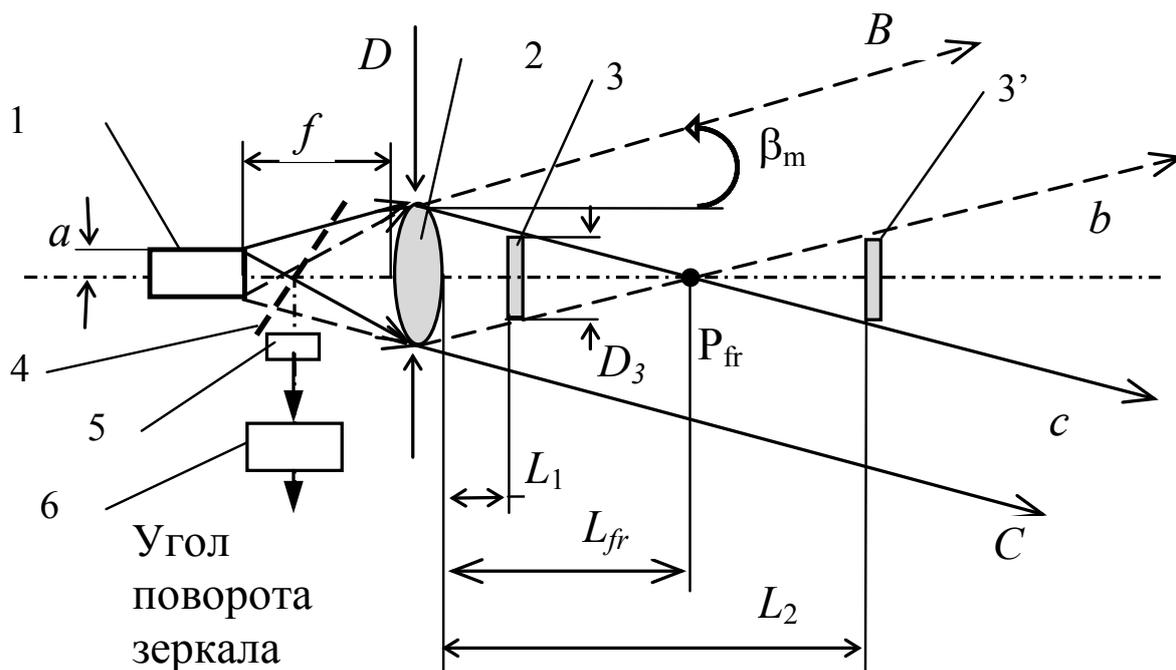


Рисунок 1. Структура автоколлимационной измерительной системы

### Структура автоколлимационной оптико-электронной системы

Автоколлимационная измерительная система включает оптико-электронный автоколлиматор, расположенный на жёсткой базе и отражатель, закреплённый на контролируемом элементе. Оптико-электронный автоколлиматор состоит из излучающего коллиматора и приемного канала — рисунок 1.

Коллиматор включает излучающую марку 1, например, инфракрасный излучающий диод с диафрагмой, установленную в фокальной плоскости объектива 2. Коллиматор формирует параллельный пучок оптического излучения и направляет его на отражатель — плоское зеркало 3.

Пучки, отражённые от зеркала 3 (на рисунке не показаны) проходят объектив 2 как приёмный и формируют изображение излучающей марки в боковой фокальной плоскости образованной светоделителем 4. С фокальной плоскостью приёмного канала совмещена чувствительная площадка матичного фотоприёмника 5 — ПЗС или КМОП матрицы. Микропроцессор 6 обрабатывает видеокadres с матичного фотоприёмника и вычисляет текущие координаты изображения марки.

При повороте плоского зеркала относительно оси, перпендикулярной оптической оси объектива 2 на угол  $\Theta$ , отражённый пучок отклоняется от первоначального направления, что приводит к смещению

изображения марки на величину  $x$ , определяемую выражением:

$$x = f \cdot \operatorname{tg}(K \cdot \Theta), \quad (1)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива 2 автоколлиматора,  $K$  — коэффициент, определяющий чувствительность отражателя к повороту. Для типовых автоколлиматоров  $K = 2$ . Подсистема обработки изображения (матричный фотоприёмник 5 и микропроцессор 6) измеряет величину смещения  $x$  и по выражению (1) вычисляет измеряемый угол.

Структура пучка коллиматора; проблема ограничения пучков оправами оптических элементов автоколлиматора

Коллиматор формирует пучок, содержащий множество элементарных параллельных пучков, каждый из которых содержит излучение одной точки излучающей марки 1. При этом угол  $\beta$  между осью элементарного пучка и оптической осью объектива определяется отношением расстояния излучающей точки от оптической оси к фокусному расстоянию  $f$

Оси элементарных пучков от крайних точек марки составляют наибольший для данного коллиматора угол  $\beta_m$  с оптической осью объектива (рисунок 1) [7]:

$$\beta_m = \operatorname{arctg}(a/f), \quad (2)$$

где  $a$  — радиус диаметр излучающей марки. На рисунке лучи от верхней точки сечения марки изображены сплошными линиями, от нижней — штриховыми линиями.

Полный пучок коллиматора представляет собой конус с углом  $\beta_m$ , с внутренней областью, ограниченной конической поверхностью, образующей которой является любой луч, идущий из края выходного зрачка с диаметром  $D_2$  под углом  $\beta_m$  к оптической оси объектива и пересекающий её в точке  $Pfr$  (лучи  $c$  или  $b$  на рисунке 1). Дистанция  $Lfr$  от центра апертуры объектива до точки  $Pfr$  есть дистанция формирования пучка. Величина  $Lfr$  рассчитывается из соотношения [7]:

$$Lfr = D2 / (2 \cdot \operatorname{tg}(\beta_m)) \quad (3)$$

При повороте плоского зеркала 3 на угол  $\Theta$  в общем случае его расположения относительно пучка коллиматора происходит срезание (виньетирование) оправой приёмного объектива 2 элементарных отражённых пучков, сформированных точками некоторой части излучающей поверхности марки 1 [7,11]. В результате распределение облучённости в изображении марки на фотоприёмной матрице становится несимметричным и энергетический центр изображения смещается относительно исходного геометрического. Поскольку подсистема обработки изображения определяет положение именно энергетического центра изображения, а измеряемый угол поворота отражателя пропорционален смещению геометрического центра, такое ограничение рабочего пучка приведёт к относительной погрешности измерения, достигающей десятков процентов в зависимости от соотношения габаритов оптических элементов [11].

#### Габаритные соотношения между параметрами оптических элементов

В типовых автоколлимационных системах зеркальный отражатель расположен на дистанции, меньшей дистанции формирования пучка (рисунок 1,  $L1 < Lfr$ ). При этом распределение облучённости в изображении марки практически не изменяется в случае малых поворотов зеркала и погрешность вследствие ограничения пучков незначительна, если изначально плоскость зеркала 3 не пересекает лучей  $c$  и  $b$ , образующих внутреннюю коническую поверхность пучка коллиматора (позиция 3 отражателя на рисунке 1). Рабочая дистанция автоколлиматора в этом случае может быть найдена по выражению (178) из литературы [7, стр. 130]:

$$L_1 = \frac{D_2 - D_3}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta_m)} = \frac{(D_2 - D_3) \cdot f}{2 \cdot a}, \quad (4)$$

где  $D_2$  — диаметр объектива 2 коллиматора,  $D_3$  — диаметр зеркального отражателя 3. Для типич-

ного автоколлиматора можно принять  $D_2 = 50$  мм,  $f = 500$  мм,  $a = 0,25$  мм [12]. Размер зеркального отражателя  $D_3$ , располагаемого на контролируемом объекте, для минимизации энергетических потерь принимают не более чем на 20...25% меньшим диаметра объектива  $D_2$ . При  $D_3 = 40$  мм в соответствии с выражением (4) рабочая дистанция автоколлиматора составит 10 м, что недостаточно для контроля деформаций протяжённых объектов, в частности, элементов опорно-поворотного устройства наземного радиотелескопа типа РТ-70.

Рабочая дистанция значительно увеличится, если зеркальный отражатель автоколлиматора расположить на расстоянии, большем дистанции формирования пучка ( $L_2 > Lfr$ , положение 3' отражателя на рисунке 1). При ранее принятых габаритах оптических компонентов рабочая дистанция составит достаточную для практических измерений величину:

$$L_2 = \frac{D_2 + D_3}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta_m)} = \frac{(D_2 + D_3) \cdot f}{2 \cdot a} = 90 \text{ м} \quad (5)$$

При условии  $L_2 > Lfr$  элементарные пучки от различных точек излучающей марки неизбежно срезаются (например, пучки  $bB$  и  $Cc$  на рисунке 1) и, следовательно, при любых габаритных соотношениях присутствует погрешность измерения вследствие ограничения рабочего пучка. Однако эта погрешность является систематической и при наличии аналитического описания может быть скомпенсирована посредством коррекции результата измерения углов.

#### Исследование погрешности измерения вследствие ограничения рабочего пучка автоколлиматора

Используем эквивалентную схему хода лучей через компоненты автоколлиматора, при которой лучи после отражения следуют через изображение 2' приёмного объектива в зеркальном отражателе. При этом отражатель определяется эквивалентной диафрагмой 3, соответствующей его апертуре.

Примем диаметр зеркального отражателя равным диаметру объектива автоколлиматора.

Нормированное распределение облучённости в изображении описывается функцией вида [13] — рисунок 3а:

$$E(r) = \frac{2}{\pi} (\arccos(\gamma(r)) - \sqrt{1 - (\gamma(r))^2} \cdot \gamma(r)), \quad (6)$$

$$\gamma(r) = \frac{2 \cdot L}{D \cdot f} \cdot r,$$

где  $r$  — радиус, определяющий положение точки изображения марки. Облучённость в осевом сечении опре-

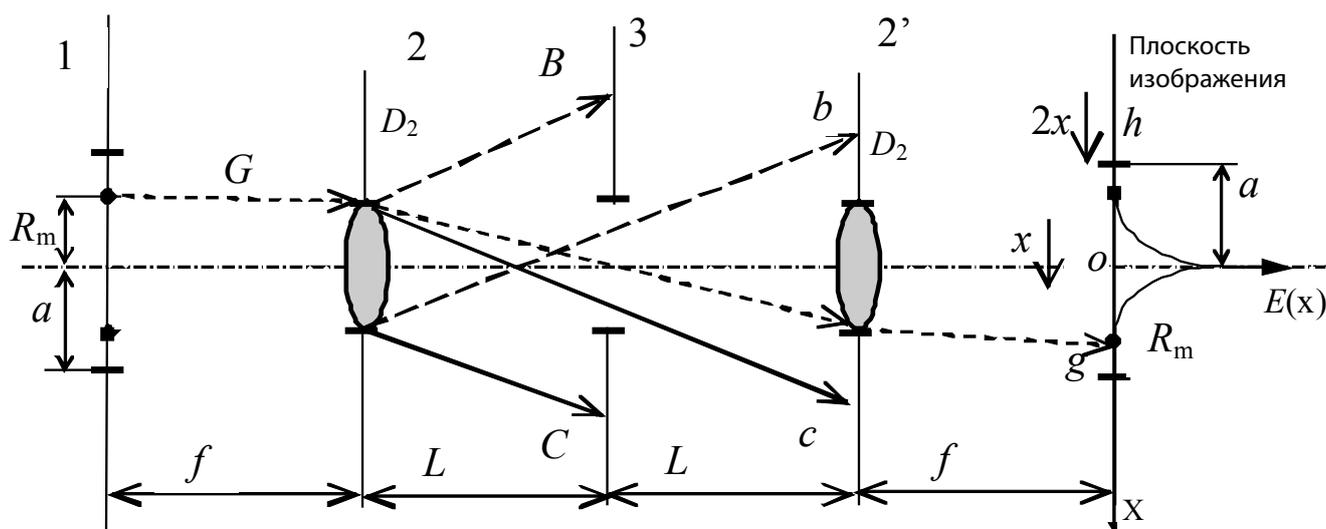
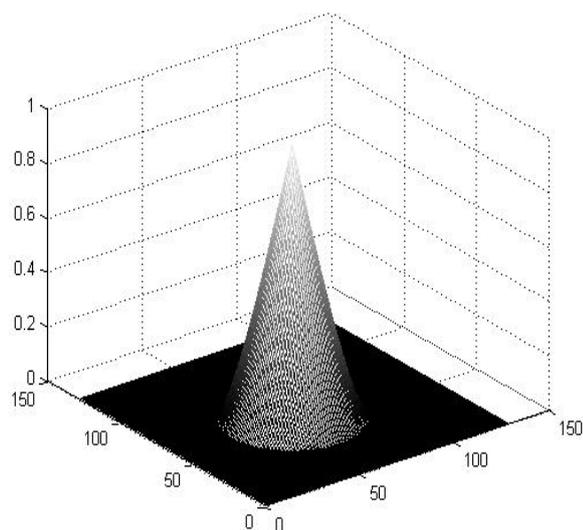
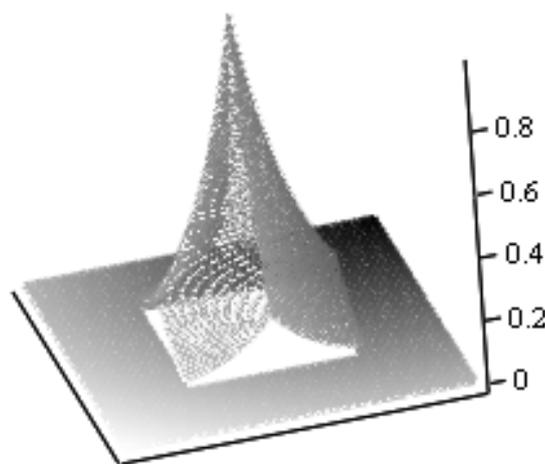


Рисунок 2. Ход лучей при расположении зеркального отражателя за точкой формирования



а)



Б

б)

Рисунок 3. Распределение облучённости (нормированное) в изображении марки:  
а) теоретическое; б) после аппроксимации

деляется функцией (6) при подстановке координаты точки по оси  $OX$ :  $r = x$  (Рисунок 2).

Из-за ограничения рабочего пучка радиус формируемого изображения  $R_m$  всегда меньше радиуса  $a$  так называемой «сопряжённой окружности», на которой лежат точки, сопряжённые с крайевыми точками излучающей марки (точка  $h$  на рисунке 2, окружность 1 на рисунке 4). В соответствии с ходом луча  $G$ , определяющего крайнюю точку  $g$  изображения, можно получить:

$$R_m = \frac{D \cdot f}{2 \cdot L} \quad (7)$$

В случае поворота зеркального отражателя на малый угол (полагаем  $\text{tg}(\Theta) \approx \Theta$  изображение излучающей марки смещается на величину  $x$ , определяемую выражением (1) при  $K = 1$ , при этом точки сопряжённой окружности смещаются на удвоенную величину  $2x$  ( $K = 2$ , выражение (1)) [13].

При смещении центра сопряжённой окружности 2 относительно центра контура изображения 1 на величину

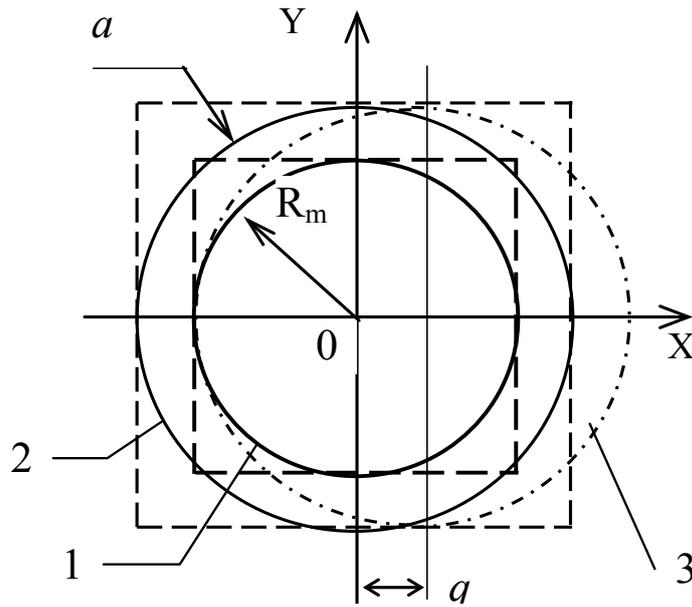
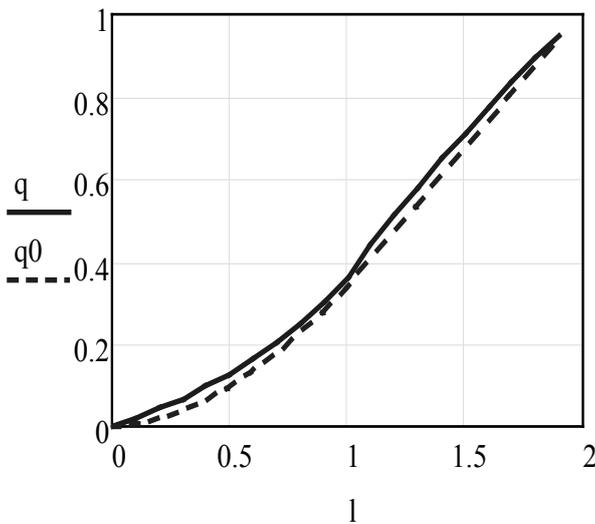
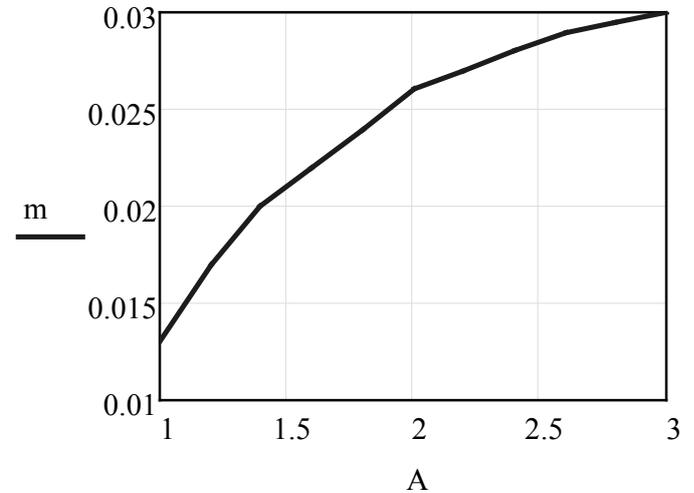


Рисунок 4. Контуры изображения марки для точной и аппроксимированной (штриховая линия) функции распределения облучённости: 1 — граница изображения марки, 2 и 3 положение — окружности сопряжённых точек марки при отсутствии и наличии поворота зеркала на угол  $\Theta_0$  соответственно



а)



б)

Рисунок 5.

- а) Зависимость  $q(l)$  погрешности измерения положения изображения марки от величины его смещения;
- б) зависимость погрешности аппроксимации от соотношения радиусов марки и изображения

ну, большую  $q = a - R_m$  (рисунок 4, положение 3) часть изображения срезается, исходное распределение облучённости изменяется, что приводит к погрешности измерения. Угол  $\Theta_0$  поворота зеркального отражателя, соответствующий смещению  $q$  определяется из выражений (1) и (7):

$$\Theta_0 = \frac{a}{f} - \frac{D}{2 \cdot L} \tag{8}$$

Погрешность  $Q$  измерения положения изображения марки по оси  $OX$  при  $\Theta > \Theta_0$  равна смещению энерги-

ческого центра распределения облучённости, которое может быть определено по алгоритму «взвешенного суммирования» [14]:

$$Q(x) = \frac{\int_{-R_m}^{R_m} \left( \int_{F1(y)}^{F2(y)} x \cdot E(x, y) dx \right) dy}{\int_{-R_m}^{R_m} \left( \int_{F1(y)}^{F2(y)} E(x, y) dx \right) dy} \quad (9)$$

где  $x = F1(y)$ ,  $x = F2(y)$  — функции, определяющие пределы интегрирования функции  $E(x, y)$  облучённости марки при её ограничении сопряжённой окружностью.

Выражение для функции погрешности  $Q(x)$  не может быть получено в аналитической форме при подстановке в (9) выражения точной функции нормированной облучённости согласно (6).

Для аналитического описания возникающей погрешности измерения предлагается точную функцию облучённости  $E(r)$  с радиальной симметрией аппроксимировать экспоненциальной функцией  $E(x, y)$  с разделяющимися при интегрировании переменными:

$$E(x, y) = \exp\left(-\frac{x + y}{k \cdot R_m}\right), \quad (10)$$

где  $k$  — безразмерный коэффициент.

По методике, изложенной в литературе [15, выражения (П1.7), (П1.11)] найдено, что различие между функциями  $E(r)$  и  $E(x, y)$  будет наименьшим при  $k = 0,61$ . График функции  $E(x, y)$ , описывающей нормированную облучённость изображения приведён на рисунке 3б.

При переходе к разделяющимся переменным контуры как изображения марки, так и сопряжённой окружности трансформируются в квадратные — рисунок 4, штриховые линии.

Аналитическое выражение функции погрешности  $Q(x)$  измерения положения изображения при подстановке аппроксимирующей функции в выражение (9) для  $\Theta > \Theta_0$  принимает вид:

$$q(l) = \frac{\exp\left(\frac{l}{k}\right) \cdot (l - k - 1) + (k + 1)}{\exp\left(\frac{l}{k}\right) - 2 \cdot \exp\left(\frac{1}{k}\right) + 1} \quad (11)$$

при  $l \leq 1$

$$q(l) = \frac{\exp\left(-\frac{l}{k}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{k}\right) \cdot (k + l - 1) - (k + 1)}{\exp\left(-\frac{l}{k}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{k}\right) - 1} \quad (12)$$

при  $1 < l \leq 2$

где  $q = Q/R_m$ ,  $l = x/R_m$  величины погрешности и меще-ния изображения, нормированные на величину радиуса  $R_m$  изображения,  $x$  — смещение геометрического центра изображения в соответствии с выражением (1) при  $K = 1$ . График функции  $q(l)$  изображён на рисунке 5а сплошной линией.

Для проверки достоверности полученных результатов с помощью численного моделирования в среде MathCad 15.0 найдены значения функции погрешности  $q0(l)$  при задании облучённости в изображении точной функцией вида (6). График функции  $q0(l)$  при  $A = a/R_m = 2$  изображён на рисунке 5а штриховой линией.

Как следует из графика зависимости величины погрешности  $m$  аппроксимации (как средней величины разности  $q(l) - q0(l)$  этих функций) от соотношения  $A$  (рисунок 5 б), это отклонение не превышает 3%, что подтверждает правильность полученных соотношений (11) и (12).

### Алгоритм компенсации систематической погрешности

На основе полученного аналитического описания погрешности измерения вследствие ограничения рабочего пучка автоколлиматора может быть построен алгоритм её компенсации, включающий следующие шаги.

1. По известным параметрам элементов оптической схемы автоколлиматора определяется радиус изображения  $R_m$  из выражения (7).

2. После поворота зеркального отражателя измеряется величина  $x$  смещения энергетического центра изображения. и

3. Вычисляется соотношение  $l = x/R_m$  затем из выражений (11) или (12) определяется величина  $q$  относительной погрешности измерения  $l$  и находится абсолютная величина погрешности  $Q = l R_m$ .

4. После вычисления уточнённого значения смещения изображения  $x' = x - Q$  по выражению (1) при  $K = 1$  находится значение измеряемого угла  $\Theta$ .

В результате использования предлагаемого алгоритма возможна реализация точных автоколлимационных измерений на рабочих дистанциях до нескольких десятков метров.

### Заключение

Анализ соотношений между параметрами оптических элементов автоколлимационной системы показал, для существенного увеличения дистанции до контроли-

руемого объекта необходимо размещение зеркального отражателя на дистанции, превышающей дистанцию формирования излучаемого пучка. Для алгоритмической компенсации возникающей при таком расположении оптических элементов погрешности измерения вследствие ограничения рабочего пучка необходимо использование аналитического описания процесса изменения функции распределения облучённости в изображении. Такое описание может быть получено при

аппроксимации точной функции облучённости с радиальной симметрией найденной функцией с разделяющимися переменными. На основе полученных соотношений разработан алгоритм компенсации погрешности измерения. При использовании найденного алгоритма возможно построение автоколлимационной системы измерения угловых деформаций протяжённых (до нескольких десятков метров) объектов промышленности и энергетики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Arakantsev, K.G., Konyakhin, I.A., and Timofeev, A.N., "Inner-base optoelectronic system for the control of linear displacements," *Key Engineering Materials* 437, 2010, 237–241.
2. Konyakhin, I.A., Timofeev, A.N., Usik, A.A., and Zhukov, D.V., "Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope," *Proc. SPIE8082*, 80823R, 2011.
3. Дефекты и способы контроля направляющих [Электронный ресурс] // Оборудование и Ремонт [Официальный сайт]. URL: <http://www.webrarium.ru/korpys-remont-napravlayshih.html> (дата обращения: 25.12.2015).
4. Кирочкин Ю. И., Журавлев И. А., Мухин Б. Л., Уланов В. А. Общие принципы геодезического обеспечения сооружения ускорительно-накопительного комплекса (УНК).-М., типография Института Физики высоких энергий, 1991.
5. Дубаренко В. В. Радиотелескопы миллиметрового диапазона // *Содружество*. 2005. № 1–2. С. 16.
6. Артеменко Ю. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные системы измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70 (Суффа) // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2008. Т. 51, № 9. С. 5–10.
7. Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трёхкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. — М.: Недра, 1991. 224 с.
8. TriAngle® electronic autocollimator [Электронный ресурс] // TRIOPTICS [Официальный сайт]. URL: <http://www.trioptics.com/triangle/description.php> (дата обращения: 24.12.2015).
9. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0.001 угловой секунды [Электронный ресурс] // Опротех: оптические цифровые измерительные системы [Официальный сайт]. URL: <http://www.optrotech.ru/issl3.php> (дата обращения: 24.12.2015).
10. Elektronische autokollimatoren [Электронный ресурс] // Möller-WedelOpticalInternational [Официальный сайт]. URL: <http://www.moeller-wedel-optical.com/produkte/elektronische-autokollimatoren> (дата обращения: 24.12.2015).
11. Высокоточные угловые измерения/Д.А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин, Э. Д. Панков. Под ред. Ю. Г. Якушенкова, М.: Машиностроение, 1987–480 с.
12. А. Н. Королев, А.и. Гарцуев, Г. С. Полищук, В. П. Трегуб Цифровой автоколлиматор // *Оптический журнал*, том 76, № 10, 2009. — С. 42–47.
13. Хуснутдинов Р. М. Влияние ограничения световых пучков на погрешность измерения следящего фотоэлектрического автоколлиматора // *Оптико-механическая промышленность*. 1989. № 9. С. 21–23.
14. Жуков Д. В., Коняхин И. А., Усик А. А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // *Оптический журнал*, том.76, № 1, 2009, с 43–45.
15. Смирнов А. Я., Меньшиков Г. Г. Сканирующие приборы.-Л: Машиностроение,, 1986. — 145 с. ил.

© Ли Женьпу (lirenpu@hotmail.com), Сахариянова Айганым Мараткызы (igalkon@hotmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

