

УДК 535.8

РАЗРАБОТКА ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ СИСТЕМ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ*

Е. С. Жимулева, П. С. Завьялов, М. С. Кравченко

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: slena@tdisie.nsc.ru*

Представлены особенности проектирования телецентрических в пространстве предметов объективов. Приведены оптические схемы трёх телецентрических объективов, разработанных для систем размерного контроля, использующих метод теневой проекции. Описан метод контроля качества изготовления таких объективов, обладающих малыми дисторсиями (менее 0,02 %) и нетелецентричностью (менее 0,01°). Дано сравнение экспериментально полученных оптических характеристик двух изготовленных нами объективов и одного фирмы Thorlabs (США).

Ключевые слова: телецентрический объектив, оптическое конструирование, контроль качества объективов, метод оптической теневой проекции.

DOI: 10.15372/AUT20180109

Введение. При изготовлении прецизионных изделий с допусками в сотые доли миллиметра необходим контроль их геометрических параметров: длины, толщины, глубины, диаметра, отклонений от соосности и др. Для решения этой задачи перспективным является использование бесконтактных оптических систем измерения. На сегодняшний день существует много видов контрольно-измерительных систем и средств размерного контроля [1–3]. Среди них большой класс составляют системы, основанные на теневом проекционном методе [4]. Такие системы позволяют определять размеры изделий с погрешностью до 5 мкм и обладают быстродействием в сотни измерений в секунду. Суть метода заключается в освещении контролируемого объекта плоским световым пучком, фотоэлектрической регистрации его теневого изображения в проходящем свете и последующем определении геометрических размеров [5, 6].

Схема теневой проекционной системы представлена на рис. 1. Источник излучения 1 диаметром $D_{ист}$ установлен в передней фокальной плоскости коллиматора 2 с фокусным расстоянием f_1 . Контролируемый объект 3 толщиной d освещается квазипараллельным пучком света. В плоскости фотоприёмной матрицы 6 посредством телецентрического объектива 4 формируется теневое изображение объекта. Если апертурная диафрагма 5 диаметром $D_{ап}$ расположена на фокусном расстоянии f_2 его передней и f_3 задней части объектива (афокальный режим), то обеспечивается телецентричность в пространстве предметов и в пространстве изображений, а объектив называется би-телецентрическим. Выходной сигнал с фотоприёмника оцифровывается. По положению фронтов сигнала определяется размер контролируемого объекта.

Под телецентрическим ходом лучей в классической формулировке понимают такой ход, при котором главные лучи внеосевых пучков, входящих или выходящих из оптической системы, параллельны оптической оси. На рис. 2 проиллюстрировано, каким образом объектив строит изображение объекта в зависимости от его телецентричности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60414X0086).

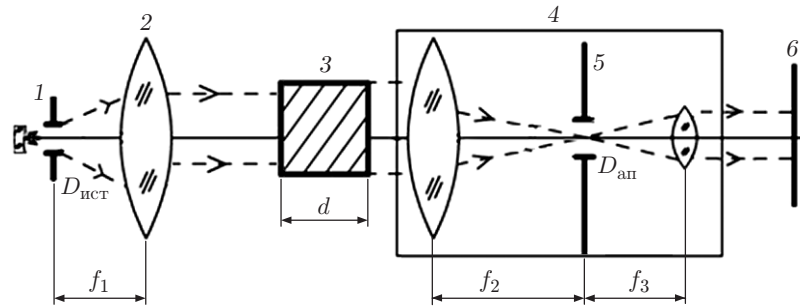


Рис. 1. Оптическая схема теневой проекционной системы

Би-телецентрические объективы одновременно телецентричны как в пространстве предметов, так и в пространстве изображений. В системах с телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов, где входной зрачок находится на бесконечности, перемещение объекта вдоль оси практически не влияет на размер изображения. Такой объектив в пространстве изображений обеспечивает падение светового потока на фотоприёмник под прямым углом по всей площади, что делает оптическую систему менее чувствительной к перемещению фотоприёмной матрицы вдоль оптической оси, а также обеспечивает равномерное освещение фотоприёмника.

Для создания систем теневого проекционного контроля геометрических размеров объектов с погрешностью не более 0,005 мм в диапазоне измерений от 12 до 30 мм [7] возникла необходимость разработки телецентрических объективов со следующими характеристиками: большой глубиной резко изображаемого пространства (более 20 мм), высокой ортоскопичностью изображения (дисторсия менее 0,05 %) и минимальным изменением увеличения системы при продольном смещении объекта. Применение таких объективов позволяет уменьшить влияние протяжённости изделия вдоль оптической оси, а также снизить требования к точности его позиционирования [8]. Объективы были разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения (КТИ НП) СО РАН.

Разработка телецентрических объективов. Для задачи размерного контроля к телецентричности в пространстве предметов предъявляются бóльшие требования, чем к телецентричности в пространстве изображений. Кроме того, требуется минимизация дисторсии, которая искажает изображение изделия и снижает точность измерения.

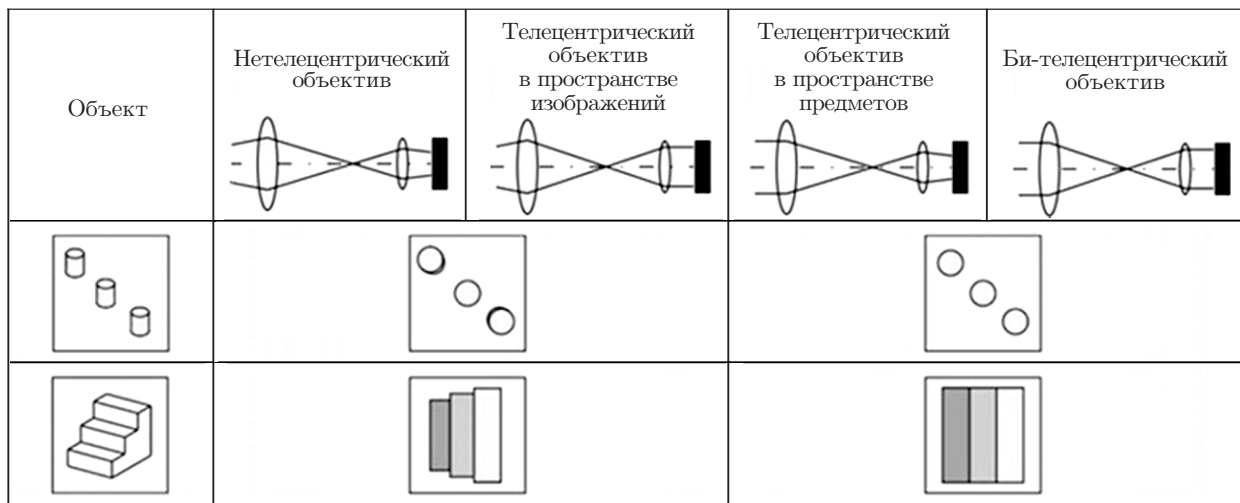


Рис. 2. Изображения, получаемые с помощью различных объективов

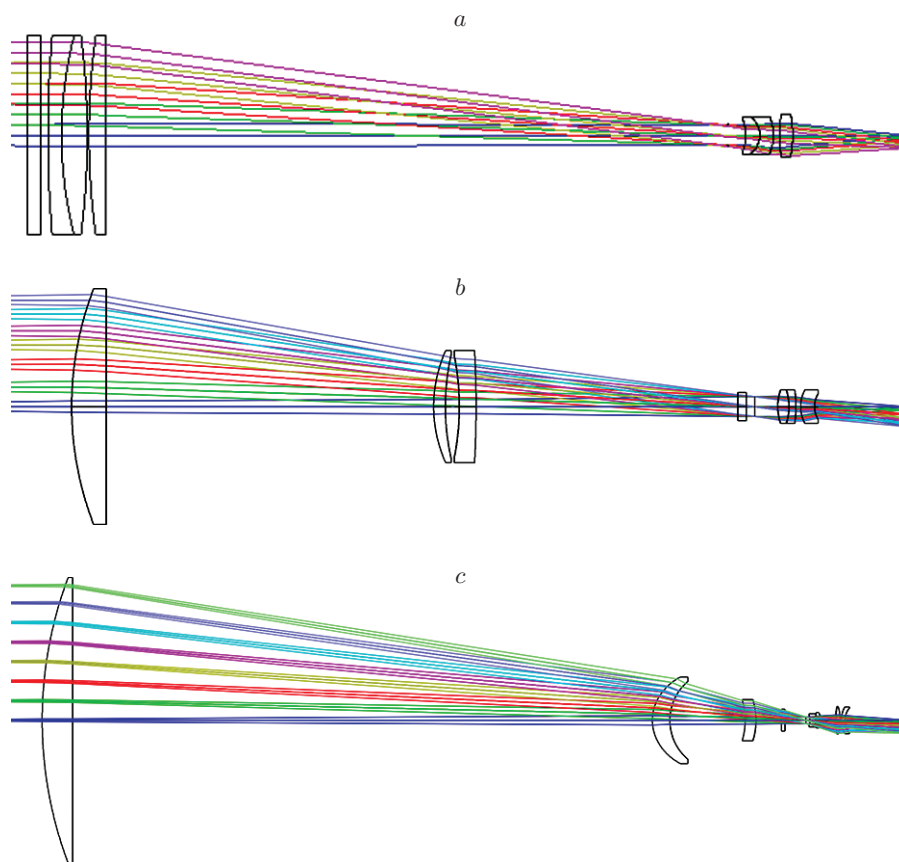


Рис. 3. Оптические схемы телецентрических объективов: *a* — $K1\ 0,155\times$,
b — $K2\ 0,189\times$, *c* — $K3\ 0,097\times$

Созданы три телецентрических объектива: $K1\ 0,155\times$ [9], $K2\ 0,189\times$, $K3\ 0,097\times$ [10]. Первые два собраны и экспериментально проверены в КТИ ИП СО РАН, оптические элементы изготовлены АО «Новосибирский приборостроительный завод». Поля зрения объективов рассчитаны на контроль изделий разного диаметра (от 10 до 250 мм). Оптические схемы телецентрических объективов представлены на рис. 3.

Схема объектива, предлагаемого в данной работе, содержит: силовой компонент, превышающий размер контролируемого изделия, который формирует телецентричность в пространстве предметов; пару менисков из стёкол с различной дисперсией, проводящих ахроматизацию передней части объектива и корригирование сферической aberrации, комы, астигматизма; апертурную диафрагму; склеенную линзу и линзу, уменьшающую кривизну поля, астигматизм, дисторсию и угол падения лучей на фотоприёмник. Для повышения технологичности изготовления первая линза в объективе является единственной линзой большого диаметра, остальные смещаются к апертурной диафрагме. При большом поле зрения (250 мм) вводится асферическая поверхность.

При формировании требований к расчёту объектива принимается во внимание влияние aberrаций, нетелецентричности, ошибок изготовления объектива и его элементов, параметров матрицы, неточности установки объекта. Максимально допустимое отклонение от телецентричности в пространстве предметов рассчитывается исходя из толщины объекта. Требования к телецентричности в пространстве изображений определяются с учётом расфокусировки изображения объекта при его смещении вдоль оптической оси.

Таблица 1

Оптические характеристики телецентрических объективов

Параметры	Thorlabs MVTC23024 0,243 [×]	Navitar Magnistar 0,051 [×]	K1 0,155 [×]	K2 0,189 [×]	K3 0,097 [×]
Увеличение	0,243	0,051	0,155	0,189	0,097
Диагональ кадра, мм	11	11	10	14,5	41
Диаметр поля зрения, мм	45	129,4	50	80	250
Рабочее расстояние, мм	103	527,7	200	150	170
Рабочее F/#	8	8	5	7	7
Глубина резко изображаемого пространства, мм	±11	±130	±20	±20	±150
Дисторсия, %	0,03	0,02	0,01	0,01	0,015
Телецентричность, град	0,147	0,03	0,028	0,01	0,019
Разрешение по центру/ по краю, лин/мм	75/50	70	110/44	86/64	95/75
Длина объектива, мм	180	630	250	300	800
Диапазон длин волн, мкм	0,46–0,63	0,46–0,63	0,61–0,66	0,61–0,66	0,61–0,66

В табл. 1 приведены расчётные параметры спроектированных в данной работе объективов, а также для сравнения показаны параметры объективов Thorlabs MVTC23024 0,243[×] [11] и Navitar Magnistar 0,051[×] [12], которые являются их аналогами.

Разработанные объективы обладают следующими преимуществами: большое поле зрения (до 250 мм), высокие ортоскопичность (менее 0,02 %), телецентричность лучей в пространстве предметов (0,019°), малый астигматизм получаемого изображения (менее 0,1 мм), хорошее разрешение по всему полю зрения (50–100 лин/мм при коэффициенте передачи контраста 0,7 отн. ед.). Объектив K3 0,097[×] имеет линейное поле зрения 250 мм с сохранением дифракционного качества изображения по всему полю. Внешний вид изготовленных объективов показан на рис. 4.

Разработка объективов велась в программном пакете ZEMAX. В каждой новой модификации объектива при увеличении поля зрения повышается телецентричность в пространстве предметов, снижается дисторсия объектива. Метод расчёта в программе ZEMAX



Рис. 4. Телецентрические объективы: 1 — K2 0,189[×], диаметр поля зрения 80 мм; 2 — K1 0,155[×], диаметр поля зрения 50 мм

основан на алгоритмах оптимизации параметров оптической системы. При проектировании телецентрических объективов были использованы все виды оптимизаций, доступные в ZEMAX (обычная, «Глобальный поиск» и оптимизация методом «Молотка») [13].

Дополнительными критериями функции качества выбраны следующие требования: максимальный размер изображения (размер фотоприёмной матрицы), относительное отверстие объектива, угол падения лучей на первую поверхность объектива (телецентричность в пространстве предметов), максимально допустимый угол падения лучей на фотоприёмную матрицу (телецентричность в пространстве изображений), максимально допустимая дисторсия объектива, ограничения на конструктивные параметры объектива и оптических элементов.

Первый объектив состоит из двух различных марок стёкол, количество линз не более шести. При увеличении линейного поля зрения телецентрического объектива добавляется дополнительный оптический элемент. В последней модификации (объектив К3 0,097 \times) использована дополнительная третья марка стекла.

На рис. 5, 6 показаны графики дисторсий и частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) разработанных объективов. Из рисунков видно, что в объективах исправлена дисторсия — не превышает 0,02 %. Объективы обладают хорошим разрешением: коэффициенты передачи контраста для пространственной частоты 50 мм $^{-1}$ не хуже 0,5 для всего поля зрения объектива. Наилучшее разрешение, близкое к дифракционному пределу, соответствует положению края объекта в кадре объектива.

Проведён анализ рассчитанных объективов с помощью программы ZEMAX. Оценка влияния остаточных aberrаций объективов и допусков их изготовления на качество получаемого изображения показала, что из-за изменения дисторсии при смещении объекта вдоль оптической оси объектива возникает смещение положения пятна, которое вносит существенную ошибку в определение размера изделий (для объектива К2 0,189 \times такая погрешность составляет 10 мкм). Применение асферической поверхности в объективе позволяет улучшить телецентричность системы более чем в 1,5 раза при увеличении поля зрения в 5 раз. Путём выбора параметров её можно свести к нулю в области границы объекта. При изготовлении и сборке объектива даже небольшое смещение (20–50 мкм) его элементов, расположенных после апертурной диафрагмы, приводит к заметному ухудшению качества изображения в сравнении с дифракционным. Наибольшее влияние оказывают децентрировки оптических поверхностей и элементов в целом.

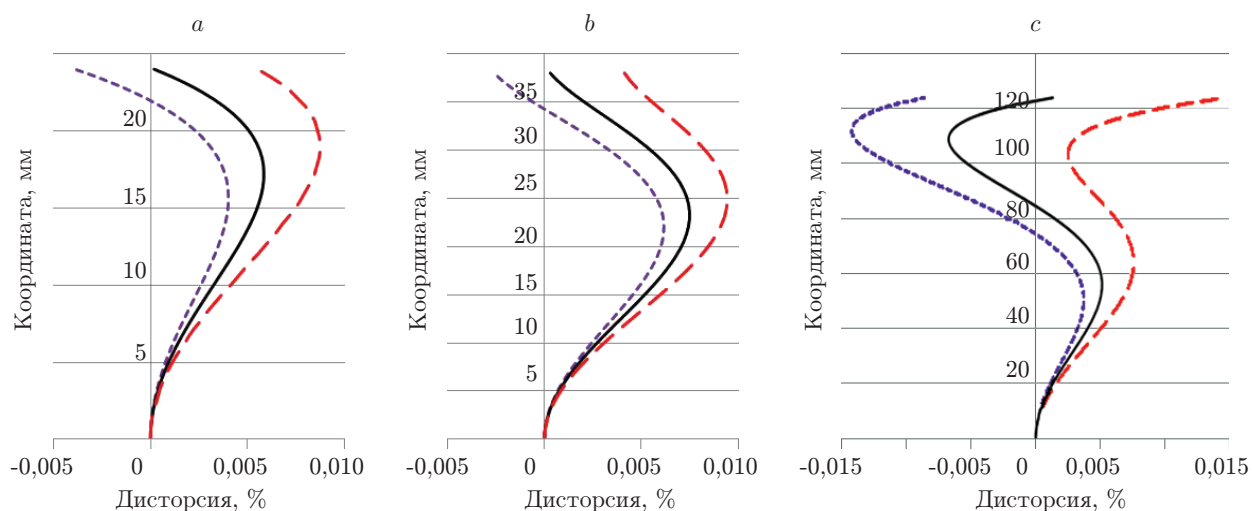


Рис. 5. Графики дисторсии объективов: *a* — К1 0,155 \times , *b* — К2 0,189 \times , *c* — К3 0,097 \times (пунктирные кривые — $\lambda = 0,61$ мкм, сплошные — $\lambda = 0,63$ мкм, штриховые — $\lambda = 0,66$ мкм)

Метод определения оптических характеристик телецентрических объективов. При производстве объективов возникают дополнительные ошибки, обусловленные несовершенством изготовления линз и последующей сборки. Это приводит к несимметричному относительно оптической оси распределению aberrаций по полю зрения.

На основе оптической схемы теневой проекционной системы (см. рис. 1) разработана методика определения aberrаций телецентрических объективов: дисторсии, её изменения вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки, телецентричности, среднего уве-

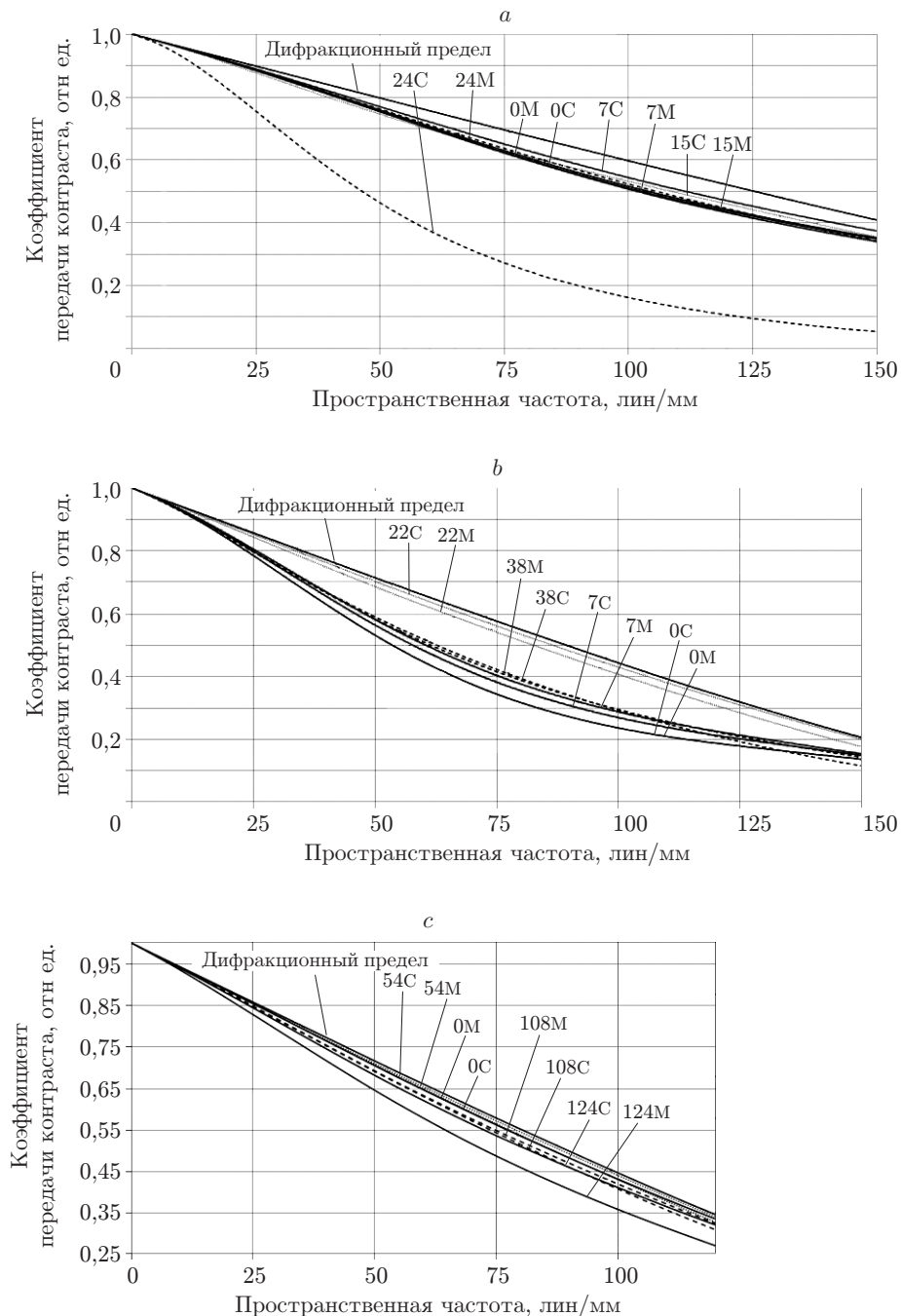


Рис. 6. Графики ЧКХ объективов: *a* — К1 0,155 \times , *b* — К2 0,189 \times , *c* — К3 0,097 \times (указаны значения поля зрения объектива (в миллиметрах): С — сагиттальная, М — меридиональная плоскости)

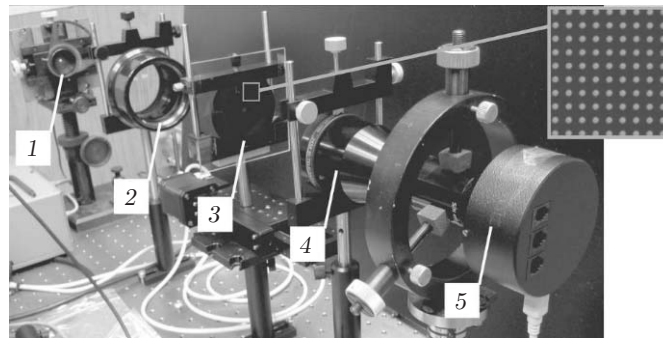


Рис. 7. Общий вид стенда для тестирования телецентрических объективов: 1 — источник освещения, 2 — коллиматор, 3 — мира на линейной подвижке, 4 — телецентрический объектив, 5 — фотоприёмная матрица

личения, среднего разрешения по полю, ЧКХ объектива в различных точках по полю. Предложенная схема также может быть использована в готовой системе контроля для проведения её калибровки. Стенд для тестирования объективов представлен на рис. 7.

В ходе работы регистрируется тенеграмма точечной миры в трёх положениях (на рабочем расстоянии и на границах глубины резко изображаемого пространства исследуемого объектива). Точечная мира представляет собой стеклянную пластинку с нанесённым непрозрачным слоем хрома, на которую методом прямой лазерной записи с высокой точностью (погрешность не более 0,1 мкм) нанесён рисунок в виде малых кружков диаметром 0,25 мм, расположенных в узлах квадратной сетки с шагом 0,5 мм. Мира изготовлена в амплитудном исполнении на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300С/М в КТИ НП СО РАН [14, 15]. Площадь миры подбирается таким образом, чтобы можно было занять всё поле зрения объектива.

Для определения дисторсии объектива на изображении точечной миры по методу центра масс находятся положения центров кружков, каждому из которых сопоставляется точка на идеальной плоскости. Весь набор центров разбивается на треугольники с помощью триангуляции Делоне. По каждой паре треугольников строится дробно-линейное конформное преобразование. Для вычисления величины дисторсии в заданной области с учётом её знака координаты каждой точки, входящей в состав треугольника, с помощью конформного преобразования переводятся из пикселей в миллиметры. Определением расстояния между центрами кружков находятся среднее разрешение по полю и увеличение объектива.

Телецентричность устанавливается исходя из смещения кружков на изображении при смещении миры вдоль оптической оси. Зная расстояние от миры до объектива, можно найти угол смещения кружка. Общее смещение всех кружков миры, обусловленное несоосностью её установки в измерительном канале, учитывается в программном обеспечении.

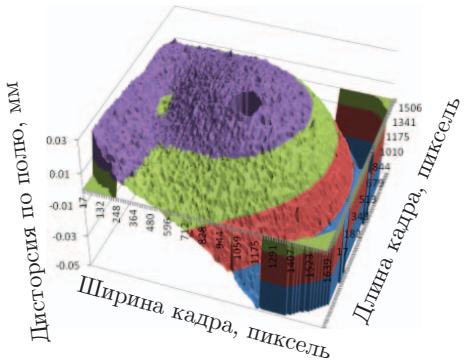
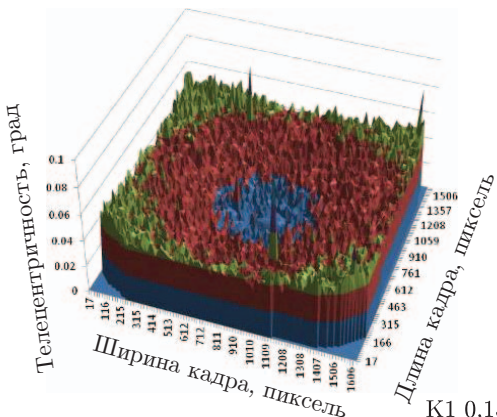
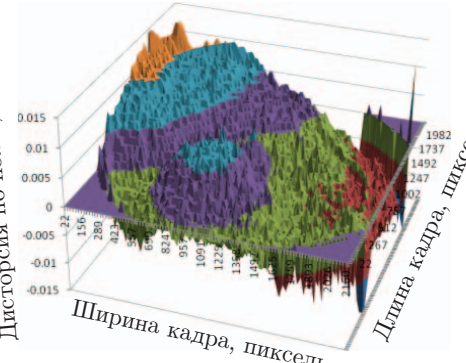
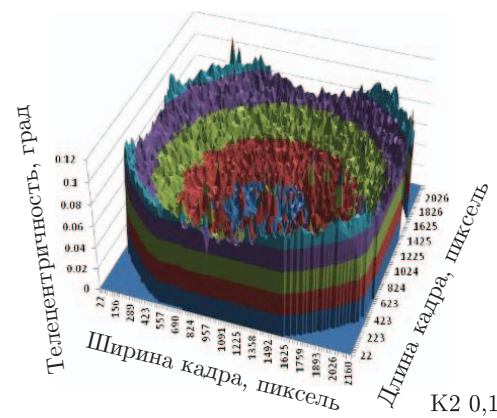
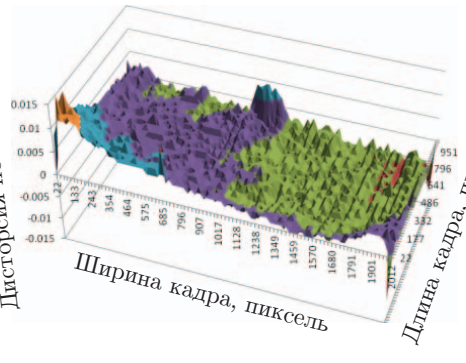
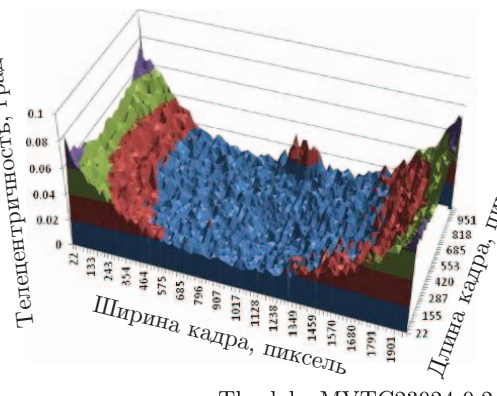
Следует обратить внимание на то, что экспериментально в предложенной методике телецентричность — это угол отклонения луча, проходящего через энергетический центр пятна рассеяния, в отличие от классического представления, где телецентричность описывается как отклонение главного луча. При значительных остаточных аберрациях эти лучи не совпадают, поскольку из-за несимметричных аберраций смещается положение энергетического центра пятна рассеяния.

Алгоритм определения ЧКХ и функции рассеяния точки объектива следующий. Размер поля зрения задаётся исходя из общего количества точек, составляющих кадр объектива. Форма сигнала от точки миры диаметром $D_p = 0,25$ мм устанавливается по формуле

$$f(x, y) = \begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2}, & x \in [-D_p/2; D_p/2], \\ 0, & x \in (-\infty; -D_p/2) \cup (D_p/2; \infty). \end{cases}$$

Таблица 2

Трёхмерные графики дисторсии и телецентричности объективов

Дисторсия	Телецентричность
<p>Поле зрения 80 мм, максимальная дисторсия 0,059 %</p>  <p>K1 0,155×</p>	<p>Максимальная нетелецентричность 0,05°</p>  <p>K1 0,155×</p>
<p>Поле зрения 50 мм, максимальная дисторсия 0,06 %</p>  <p>K2 0,189×</p>	<p>Максимальная нетелецентричность 0,118°</p>  <p>K2 0,189×</p>
<p>Поле зрения 45 мм, максимальная дисторсия 0,066 %</p>  <p>Thorlabs MVTC23024 0,243×</p>	<p>Максимальная нетелецентричность 0,147°</p>  <p>Thorlabs MVTC23024 0,243×</p>

Изображение точки, сформированной на фотоприёмнике объективом, определяется как свёртка сигнала с импульсным откликом оптической системы [16]:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta,$$

где $g(x, y)$ — форма сигнала, полученная на фотоприёмнике; $h(x, y)$ — импульсный отклик оптической системы или функция рассеяния точки.

Для определения функции рассеяния точки системы выполняется операция двумерной деконволюции (обратной свёртки) сигнала от точки мира по известной формуле [17, 18]

$$h(x, y) = F^{-1} \left(\frac{F(g(x, y))}{F(f(x, y))} \right) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{F(g(x, y))}{F(f(x, y))} \right) e^{i(ux + vy)} dudv,$$

где F — преобразование Фурье, F^{-1} — обратное преобразование Фурье.

Оптическая передаточная функция связана с функцией рассеяния точки прямым преобразованием Фурье. Взяв квадрат модуля передаточной функции, получим ЧКХ. При необходимости можно вычислить фазовую передаточную функцию как аргумент оптической передаточной функции.

В соответствии с указанным методом проведено исследование и сравнение трёх телецентрических объективов (K1 0,155 \times , K2 0,189 \times и Thorlabs MVTC23024 0,243 \times), которые показали, что разработанные объективы обладают меньшими дисторсией и нетелецентричностью, большим полем зрения, однако объектив Thorlabs рассчитан на больший спектральный диапазон и обладает лучшим разрешением. В табл. 2 показаны полученные картины дисторсионных искажений и телецентричности трёх объективов.

Из анализа таблицы следует, что в разработанных объективах существенно увеличено поле зрения при несколько улучшенной максимальной дисторсии. Изготовленные в КТИ НП СО РАН объективы обладают неосесимметричной дисторсией, что вызвано смещением положения сферических поверхностей линз задней части объектива (неточность их изготовления и сборки). Необходимо повышать требования к изготовлению как оптических, так и механических элементов телецентрических объективов. Смещение апертурной диафрагмы из фокуса передней части объектива приводит к общему ухудшению телецентричности объективов.

Заключение. В данной работе рассчитаны и изготовлены три телецентрических объектива для систем размерного контроля, обладающие улучшенными оптическими характеристиками по сравнению с существующими: увеличенными полем зрения (до 250 мм), разрешением (до 100 лин/мм), телецентричностью в пространстве предметов (не более 0,03 $^\circ$) и уменьшенной дисторсией (менее 0,02 %). Приведены оптические схемы разработанных объективов, а также рассчитанные и экспериментально полученные графики их aberrаций.

Предложен и реализован метод определения качества изготовления и сборки телецентрических объективов, который позволяет находить одновременно: дисторсию, телецентричность, увеличение, среднее разрешение по полю, ЧКХ. Ввиду простоты реализации метод можно применять к уже встроенным в систему контроля объективам. Для снижения погрешности измерений целесообразно использовать дополнительную калибровку, основанную на предложенной методике.

С использованием результатов проведённых исследований созданы три установки контроля бронероликов, керамической бронеплитки, кольцевых изоляторов [8]. Наилучший

результат, который удалось получить на установках контроля с применением метода теневой проекции — измерение диаметров в диапазоне от 12 до 30 мм с погрешностью не более $\pm 0,005$ мм. С 2014 года установки успешно эксплуатируются на ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» (г. Новосибирск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник /Под ред. В. В. Клюева М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. **Волосов С. С., Педь Е. И.** Приборы для автоматического контроля в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1975. 336 с.
3. **Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
4. **Chugui Y. V., Senchenko E. S.** 3D image formation in transmitted partially coherent and incoherent light applied to dimensional inspection // Intern. Journ. Automat. Technol. 2015. 9, N 5. P. 508–514.
5. **Чугуй Ю. В.** Фурье-оптика трёхмерных объектов постоянной толщины на основе дифракционных моделей // Автометрия. 2017. 53, № 5. С. 90–105.
6. **Чугуй Ю. В.** Расчёт положения границы объекта при его проецировании в пространственно-неинвариантной когерентно-оптической системе // Автометрия. 2016. 52, № 6. С. 50–60.
7. **Завьялов П. С., Финогенов Л. В., Жимулева Е. С. и др.** Оптико-электронный контроль керамических изделий // Датчики и системы. 2016. № 8–9. С. 64–72.
8. **Волков Д. Ю.** Разработка и исследование объективов с телецентрическим ходом лучей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. С.-Пб., 2004. 20 с.
9. **Белобородов А. В., Гущина А. А., Завьялов П. С. и др.** Оптико-электронный контроль керамических колец // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 25–29.
10. **Пат. 2623819 РФ.** Телецентрический в пространстве предметов объектив /Е. С. Жимулева, П. С. Завьялов. Заяв. 19.04.2016. Оpubл. 29.06.2017, Бюл. № 19.
11. **Thorlabs, Inc.** URL: <https://thorlabs.us/> (дата обращения: 28.11.2016).
12. **Navitar.** URL: <https://navitar.com/> (дата обращения: 28.11.2016).
13. **Zemax LLC.** URL: <http://www.zemax.com> (дата обращения: 28.11.2016).
14. **Chugui Y. V., Verkhoglyad A. G., Zavyalov P. S. et al.** Optical measuring and laser technologies for scientific and industrial applications // Intern. Journ. Automat. Technol. 2015. 9, N 5. P. 515–524.
15. **Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Каличкин А. Е. и др.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях // Датчики и системы. 2015. № 9–10. С. 45–52.
16. **Дубнищев Ю. Н.** Колебания и волны. С.-Пб.: Лань, 2011. 384 с.
17. **Сысоев Е. В., Выхристюк И. А.** Повышение поперечного разрешения при измерении 3D рельефа интерференционным методом // Сб. матер. Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014». Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 59–64.
18. **Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В.** Дифракция Фраунгофера на объемных телах постоянной толщины // Автометрия. 1987. № 3. С. 79–92.

Поступила в редакцию 28 ноября 2016 г.