

Н. А. Митюшенко^{1}, Т. Н. Хацевич¹*

Разработка бителецентрического объектива

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: mit_n_a@mail.ru

Аннотация. Широко известны контактные инструменты для измерения геометрических размеров объектов: штангенциркули, механические микрометры. Они обладают большой погрешностью и низким быстродействием. Существуют специализированные измерительные приборы, лишенные вышеперечисленных недостатков – бесконтактные микрометры. В основу их работы положен теневой принцип, суть которого заключается в параллельном освещении исследуемого объекта монохроматическим излучением и регистрации теневой картины. Тень от измеряемого объекта попадает на КМОП матрицу, на основании анализа сигналов с элементов приемника излучений в процессоре прибора вычисляются размеры объекта. Существенным недостатком этого метода является ограниченный диапазон измерений, который определяется размерами приемника излучений. Для его расширения используется специальный проекционный объектив. Он позволяет перенести теневое изображение большего измеряемого предмета на меньшую матрицу. В статье представлены результаты разработки бителецентрического объектива для бесконтактного лазерного микрометра и систем технического зрения. Используются методы инженерной оптотехники, компьютерного проектирования оптических систем и 3D моделирования изделий оптического приборостроения. Сформулированы требования к дисторсии и отступлению от телецентричности объектива, обусловленные требованиями к погрешности измерений бесконтактного микрометра. Приведены результаты расчета оптической системы бителецентрического объектива для бесконтактного микрометра и разработана его конструкция. Учитывая технологичный дизайн оптических элементов объектива, простоту конструкции и высокое качество изображения, делается вывод о возможности использования разработанного объектива для практических применений.

Ключевые слова: бителецентрический объектив, бесконтактный микрометр, проектирование

N. A. Mityushenko^{1}, T. N. Hatsevich¹*

Development of a bi-telecentric lens

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: mit_n_a@mail.ru

Abstract. Contact tools for measuring the geometric dimensions of objects are widely known: calipers, mechanical micrometers. They have a large margin of error and low performance. There are specialized measuring instruments that are free of the above disadvantages. They are contactless micrometers. Their work is based on the shadow principle, the essence of which is the parallel illumination for the object under study by monochromatic radiation and registration of the shadow pattern. The shadow of the measured object falls on the CMOS matrix. The dimensions of the object are calculated based on the analysis of signals from the elements of the radiation receiver in the processor of the device. A significant disadvantage of this method is the limited measurement range, which is determined by the size of the radiation receiver. A special projection lens is used to expand it. It allows transferring the shadow image of a larger measured object to a smaller matrix. Here we

present the results of the development of a bi-telecentric lens for a non-contact laser micrometer and technical vision systems. Methods of optical engineering, computer-aided design of optical systems and 3D modeling of optical instrumentation products are used. The requirements for distortion and deviation from the telecentricity of the object are formulated due to the requirements for the measurement error of a non-contact micrometer. The results of calculating the optical system of a bi-telecentric lens for a non-contact micrometer are presented and its design is developed. Taking into account the technological design of the optical elements of the lens, as well as the simplicity of the design and the high quality of the image, it is concluded that the developed lens can be used for practical applications.

Keywords: bitelecentric lens, non-contact micrometer, design

Введение

Наука начинается там, где начинаются измерения. Невозможно не согласиться с данным высказыванием Дмитрия Ивановича Менделеева, как невозможно представить современную науку и производственные технологии без точных измерений. Возможностью объединить все три составляющих: оптическую науку, искусственный интеллект, цифровую обработку – является автоматизация контроля геометрических размеров деталей. Размерный контроль деталей в автоматическом режиме позволяет осуществлять не выборочный, а стопроцентный контроль деталей непосредственно на конвейере, осуществлять отбраковку при необходимости, позволяет исключить контактные методы контроля и субъективные ошибки оператора. Для данных целей подходит бесконтактный микрометр. В основу работы такого микрометра положен теневой метод. Суть данного метода заключается в освещении исследуемого объекта параллельным монохроматическим пучком лучей и регистрации теневой картины. Тень от измеряемого объекта попадает на КМОП матрицу, далее путем обработки сигналов в процессоре определяются размеры измеряемого объекта.

Существенный недостаток данного метода – ограниченный диапазон измерений, который обуславливается размерами самого приемника: если тень будет больше самого приемника, то измерения не могут проводиться. Для преодоления указанного ограничения существует два технических решения – первое, это использование матрицы бóльшего размера, но это ведет к существенному удорожанию всего микрометра, к тому же размеры уже существующих матриц весьма ограничены. Вторым решением является использование специальной проекционной оптики (рис. 1).

Коллиматор коллимирует излучение лазерного светодиода в параллельный пучок лучей, который освещает измеряемый объект. Специальный бителецентрический объектив переносит теневое изображение бóльшего измеряемого предмета на меньшую матрицу [1]. Наличие телецентрического хода главных лучей в пространстве предметов позволяет принципиально обеспечить постоянство линейных увеличений объектива вне зависимости от позиционирования измеряемого объекта вдоль оптической оси в пределах глубины резко изображаемого пространства в бесконтактном микрометре или в системах технического зрения.

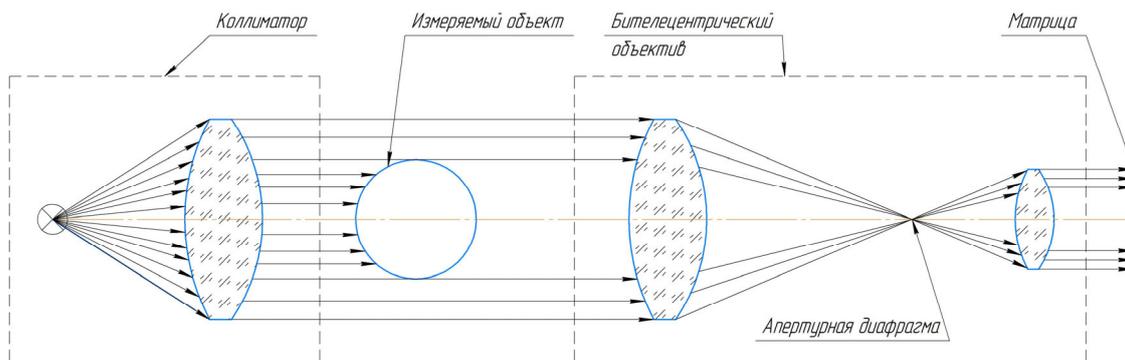


Рис. 1. Принцип действия лазерного бесконтактного микрометра

Цель статьи: представить результаты разработки бителецентрического объектива для бесконтактного лазерного микрометра и систем технического зрения. Используются методы инженерной оптотехники, компьютерного проектирования оптических систем и 3D моделирования изделий оптического приборостроения.

Методы и материалы

Обоснование требований к оптической системе бителецентрического объектива строится на оценке влияния характеристик объектива на погрешность измерений геометрических размеров объектов. Основными ошибками, влияющими на погрешность измерений, являются отступления от телецентрического хода главных лучей внеосевых пучков в пространстве предметов (нетелецентричность), дисторсия объектива и дискретность приемника излучений [2, 3]. Для каждой из вышеперечисленных ошибок получены выражения для определения составляющих погрешности измерений:

– составляющая погрешности измерений δ_φ , обусловленная отступлением от телецентричности в пространстве предметов:

$$\delta_\varphi = T\varphi/2 ; \quad (1)$$

– составляющая погрешности измерений δ_Δ , обусловленная дисторсией объектива:

$$\delta_\Delta = y\Delta ; \quad (2)$$

– составляющая погрешности измерений δ_k , обусловленная дискретностью приемника излучений:

$$\delta_k = a/k\beta, \quad (3)$$

где T – глубина резко изображаемого пространства объектива (расстояние вдоль оптической оси, в пределах которого могут располагаться измеряемые объекты в процессе измерений); φ – отступление от телецентрического хода главных лучей внеосевых пучков в пространстве предметов объектива; y – размер измеряемого объекта; Δ – относительная дисторсия объектива; β – линейное увеличение бителецентрического объектива; a – шаг пикселей приемника излучений; k – коэффициент, определяющий возможности обработки сигналов системой в приборе и определять координаты с погрешностью в k меньше шага пикселей.

Оценка проведена для следующих исходных параметров: диапазон измерений 50 мм, $T = 20$ мм, приемник излучений формата 4000x3000 [4], шаг пикселей 1,85 мкм; $\delta_\varphi = \delta_\Delta = \delta_k = 0,02$ мм. Получено, что при линейном увеличении объектива $\beta = 0,111^x$ предельно допустимые значения первичных ошибок составят: $\Delta = 0,08$ %; $\varphi = 7'$; $k = 1$. Необходимо принимать во внимание, что предельно допустимые значения ошибок определены в предположении и погрешность измерения обусловлена только одной из указанных первичной ошибкой при отсутствии остальных. Такая оценка определяет предельно допустимые значения нетелецентричности и дисторсии в бителецентрическом объективе при его применении для размерного контроля изделий.

Структурно оптическая схема бителецентрического объектива включает два компонента, разнесенных вдоль оптической оси на такое расстояние, при котором задняя фокальная плоскость первого компонента совпадает с передней фокальной плоскостью второго компонента, и в этой совмещенной плоскости размещается апертурная диафрагма объектива. Эквивалентное фокусное расстояние бителецентрического объектива равно бесконечности, входной и выходной зрачки объектива также расположены в бесконечности. При таком схемном решении используется уникальное свойство афокальных систем: постоянство линейного, углового и продольного увеличений вне зависимости от положения предметной плоскости (рис. 2).

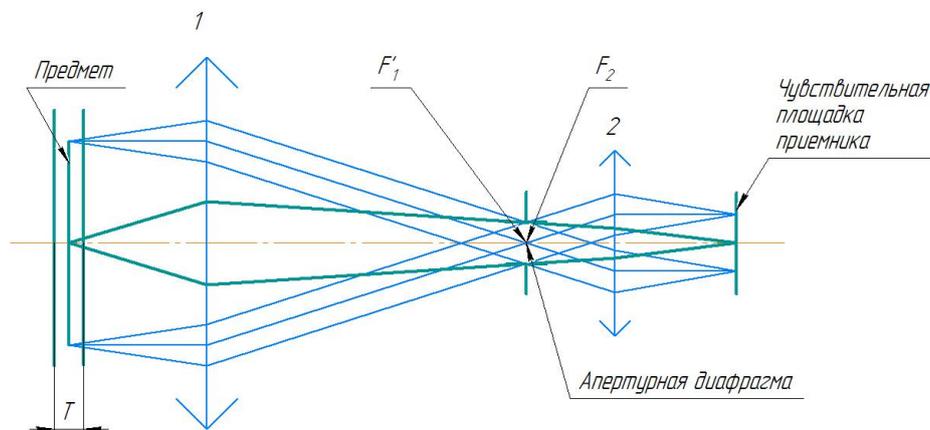


Рис. 2. Принципиальная схема бителецентрического объектива

Далее описывается последовательность разработки оптической системы, использованная для разработки бителецентрического объектива со следующими характеристиками: $\beta=0,111^x$, линейное поле в пространстве предметов 50 мм, числовая апертура в пространстве предметов 0,16.

Синтез компонента 1 проводился в обратном ходе лучей с использованием методики М.М. Русинова [5]. В качестве базового компонента выбрана плоско-выпуклая линза, ориентированная плоской поверхностью к плоскости апертурной диафрагмы, размещенной в фокальной плоскости линзы. Для коррекции астигматизма и кривизны изображения к ней добавлен двухлинзовый корректор. В стартовой системе элементы корректора задавались плоскопараллельными пластинками. Определение формы линз корректора было выполнено методами компьютерного проектирования оптических систем при одновременном контроле отступления главных лучей от телецентрического хода для ряда точек поля.

Синтез компонента 2 осуществлялся в прямом ходе лучей при размещении апертурной диафрагмы в его передней фокальной плоскости. Поскольку относительное отверстие компонента 2 в $1/\beta$ раз больше относительного отверстия компонента 1, то в стартовой системе базовая силовая линза была дополнена двумя двухлинзовыми компенсаторами: первый компенсатор, расположенный перед линзой, предназначался для коррекции aberrаций широких пусков лучей (сферической aberrации и комы), второй, расположенный после силового компонента, – для коррекции полевых aberrаций (астигматизма, кривизны изображения, дисторсии).

При окончательной оптимизации оптической системы (рис. 3) особое внимание уделялось балансировке таких aberrаций, как дисторсия и отступление от телецентрического хода главных лучей в пространстве предметов.

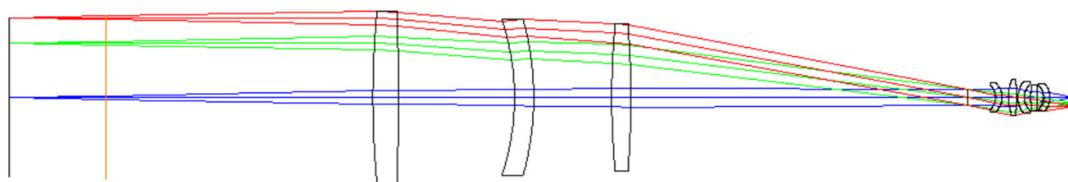


Рис. 3. Оптическая система разработанного бителецентрического объектива $0,111^x$

Строгое обеспечения телецентрического хода главных лучей в пространстве предметов достигалось коррекцией сферической aberrации в зрачках оптической системы при одновременном контроле aberrаций в плоскости изображений [6].

Параллельное проектирование механической части

Параллельно с расчетом оптической системы создавались твердотельные модели в программе «Компас 3D». Параллельное проектирование позволяет ускорить процесс создания конструкторской документации и минимизирует вероятность ошибок при ее разработке. Основным инструментом параллельного проектирования являются переменные [7]. Ключевые параметры, которые вносились в таблицу переменных, – это радиусы кривизны, толщины по оси, полные диаметры и расстояния между компонентами. Хранение всех переменных обеспечивается в общей сборке оптической и механической составляющих. Использовался способ переноса созданных переменных из программы в файл Excel. Такой перенос позволяет создать ограниченный набор переменных под конкретную задачу проектирования. При внесении переменных в программу [8] учитываются припуски на крепление оптических деталей в механическом корпусе согласно рекомендациям [9, 10].

Для корректного использования таблицы переменных была применена полная параметризация модели оптической системы. На ее основе проектируется корпус объектива и промежуточные кольца. При изменении оптических параметров в таблице переменных автоматически корректируется длина промежуточных колец и длина корпуса. Апертурная диафрагма конструктивно включена во второй оптический блок отдельной деталью, закрепляемой с помощью резьбового кольца (рис. 4). Для юстировки объектива предусматривается подрезка торцов оправ оптических блоков.

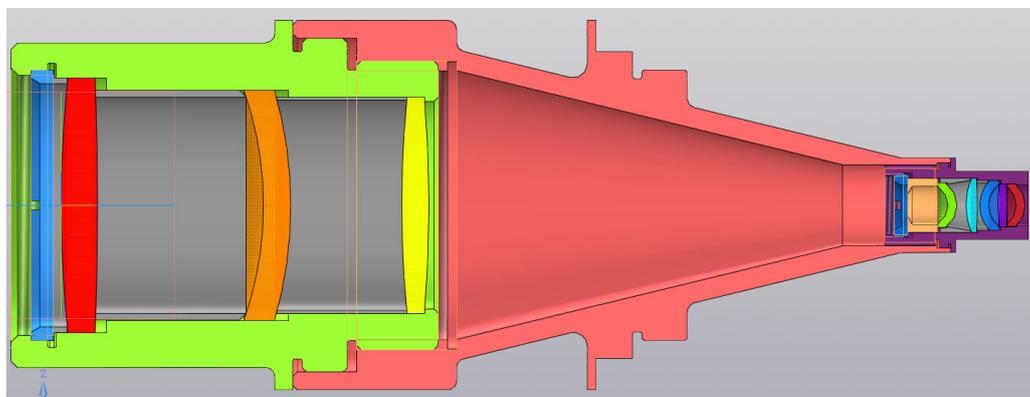


Рис. 4. 3D-модель конструкции бителецентрического объектива 0,111^X

Предложенная методика параллельного проектирования позволяет существенно сократить время на разработку конструкции объектива и технической документации на нее.

Результаты и обсуждение

Контроль значений дисторсии осуществлялся на всех этапах оптимизации оптической системы объектива (рис. 5).

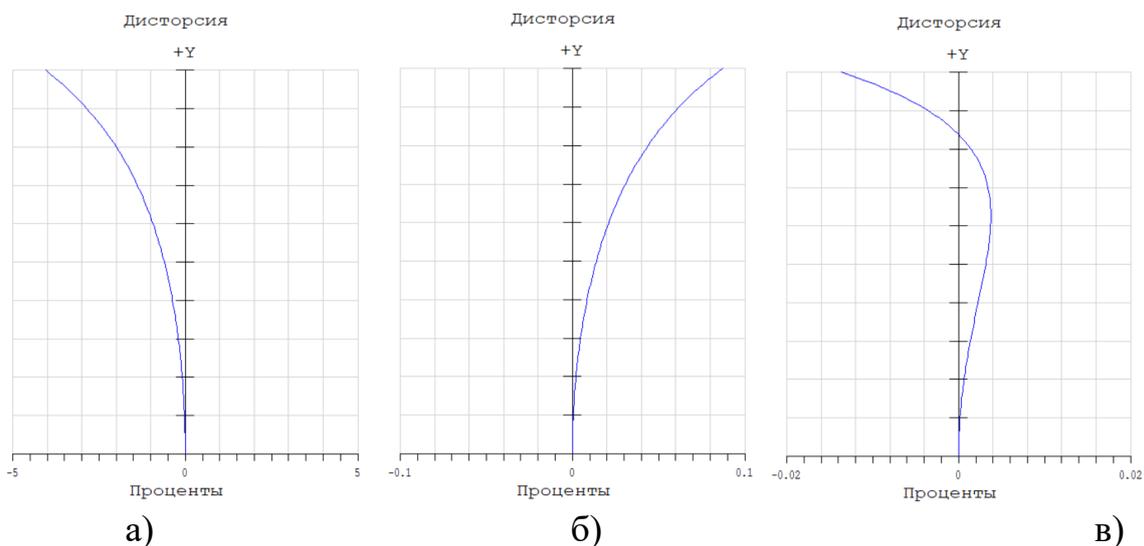


Рис. 5. Дисторсия объектива:

а – стартовая система; б – промежуточный вариант оптической системы;
в – итоговый вариант объектива

Графики иллюстрируют изменение значений дисторсии в ходе разработки оптической системы объектива, начиная со значения 4 до 0,014 % в итоговом варианте оптической системы. Таким образом, значение дисторсии в разработанном объективе примерно в 5 раз меньше максимально допустимого значения.

Результаты анализа нетелецентричности в пространстве предметов приведены на рис. 6.

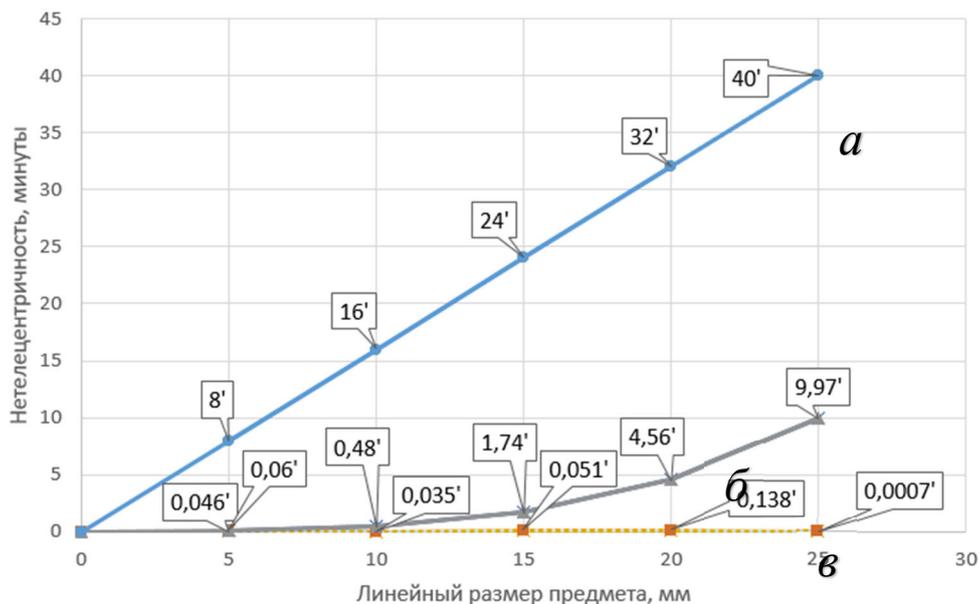


Рис. 6. Нетелецентричность в пространстве предметов:

а – стартовая система; б – промежуточный вариант оптической системы; в) – итоговый вариант объектива

Графики иллюстрируют изменение значений нетелецентричности хода главных лучей в пространстве предметов в ходе разработки оптической системы объектива, начиная со значения 40 до 0,014' в итоговом варианте оптической системы.

Анализ суммарного влияния дисторсии и отступления от телецентрического хода лучей в разработанной системе объектива на размер изображения проводился с использованием трассировки главных лучей при смещении плоскости объекта в пределах глубины резко изображаемого пространства. Результаты расчетов показали, что при изменении расстояния до плоскости предметов на 10 мм различие в размерах изображений на чувствительной площадке приемника составляют 0,0007 мм. Погрешность измерения, обусловленная указанной ошибкой, составит 0,006 мкм.

Заключение

Авторы выражают надежду, что представленные результаты разработки бителецентрического объектива со следующими характеристиками: линейное увеличение 0,111^x; диапазон измерения 50 мм, обеспечивающего дисторсию не более 0,014 % и высокую степень телецентричности в пространстве измеряемых объектов (отклонение не более 0,014'), представляют интерес для разработчиков бесконтактных систем размерного контроля.

Описанный в статье метод синтеза стартовой системы оптической системы бителецентрического объектива в совокупности с параллельным проектированием конструкции объектива позволяет в короткие сроки осуществлять кастомизацию под конкретные технические требования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 2D Оптические микрометры // ООО "Рифтэк" URL: https://riftek.com/ru/products/2D_optical_micrometers/ (дата обращения: 1.02.2023).
- 2 Жимулева Е.С., Завьялов П.С., Кравченко М.С. Разработка телецентрических объективов для систем размерного контроля // Автометрия. - 2018. - №54.
- 3 Чугуй Ю. В. Фурье-оптика протяжённых объектов постоянной толщины. - Новосибирск: НГТУ, 2021. - 456 с.
- 4 Каталог датчиков // npk-photonica URL: <https://www.npk-photonica.ru/info/reading/18354/> (дата обращения: 1.02.2023).
- 5 Русинов М. М. Техническая оптика: Учебное пособие для вузов. - Ленинград: Машиностроение, 1979. - 488 с.
- 6 Хацевич Т. Н. Компьютерные методы проектирования оптических систем : учебник. - Новосибирск: СГУГиТ, 2022. - 156 с.
- 7 Михайлов И.О. САД-технологии. Проектирование технической системы методом «сверху вниз» : учеб.-метод. пособие . - Новосибирск: СГУГиТ, 2020. - 204 с.
- 8 Учебная версия программы твердотельного моделирования Компас 3D // ascon.ru URL: <https://edu.ascon.ru/main/download/cab/> (дата обращения: 1.02.2023).
- 9 Плотников В. С Расчет и конструирование оптико-механических приборов : учебник. - 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1983. - 256 с.
- 10 Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов: уч. пособие. - СПб.: Политехника, 2007. - 579 с.

© Н. А. Митюшенко, Т. Н. Хацевич, 2023