

Е. А. Шмурыгин^{1}, И. О. Михайлов^{1*}*

Математическая модель устройства для селективного подбора оптических компонентов бинокулярных телескопических систем

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

*e-mail: podosinovik00@mail.ru, prooptiku@gmail.com

Аннотация. В настоящее время наиболее экономически выгодным методом сборки сложных устройств является селективная сборка. Однако основным недостатком этой технологии является ограничение её применения в серийном и, тем более, массовом производстве. Решение технических и технологических проблем, связанных с селективной сборкой, представляет собой важную и актуальную задачу. Данная статья посвящена представлению математической модели устройства для селективного подбора оптических компонентов бинокулярных телескопических систем в автоматическом режиме. В статье представлено теоретическое обоснование математической модели, подтвержденное расчетами, рассматривается метод вычисления увеличения оптических систем и погрешностей фокусных расстояний компонентов, вывод рабочей формулы измерительного устройства, принцип его работы, основанный на косвенных измерениях. В статье проведено числовое моделирование вычислений, предложен алгоритм обработки сигнала.

Ключевые слова: селективная сборка, бинокулярная телескопическая система, объектив, оптические приборы, определение фокусного расстояния, математическая модель устройства, измерительное устройство

E. A. Shmurygin^{1}, I. O. Mikhailov^{1*}*

A mathematical model of a device for selective selection of optical components of binocular telescopic systems

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: podosinovik00@mail.ru, prooptiku@gmail.com

Abstract. Currently, the most cost-effective method of assembling complex devices is selective assembly. However, the main disadvantage of this technology is the limitation of its use in serial and, moreover, mass production. Solving technical and technological problems related to selective assembly is an important and urgent task. This article is devoted to the presentation of a mathematical model of a device for the selective selection of optical components of binocular telescopic systems in automatic mode. The article presents the theoretical justification of the mathematical model, confirmed by calculations, considers the method of calculating the magnification of optical systems and errors of focal lengths of components, as well as the conclusion of the working formula of the measuring device, considers the principle of its operation based on indirect measurements. The article provides numerical simulation of calculations, based on the work carried out, a signal processing algorithm was proposed.

Keywords: selective assembly, binocular telescopic system, lens, optical instruments, focal length determination, mathematical model of the device, measuring device

Введение

Одной из главных проблем в оптическом приборостроении является достижение требуемых характеристик точности функционирования изделия, а соответственно точности его изготовления. Это вызвано несколькими факторами: сложностью структуры оптических систем, необходимостью согласования компонентов и высокими требованиями к качеству материалов и обработке поверхностей. Решением проблемы, в частности, является селективный подбор компонентов, улучшенные методы контроля качества и внедрение автоматизации и роботизации для повышения точности и эффективности производства.

Теоретическое обоснование расчетов

Разница в увеличениях оптических каналов бинокулярных приборов колеблется в диапазоне от 1,5 до 3 % в зависимости от типа прибора и его углового поля зрения.

Увеличение телескопической системы Γ может быть определено различными методами, включая использование фокусных расстояний объектива $f'_{об}$ и окуляра $f'_{ок}$, входящих в оптическую схему системы, по формулам [1, 2]:

$$\Gamma = \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} . \quad (1)$$

Далее, используя формулу (1), вычисляется вклад погрешностей фокусных расстояний компонентов оптической системы ($\Delta f'_{об}$ и $\Delta f'_{ок}$) в общую погрешность увеличения $\Delta \Gamma_{f'_{об}}$.

$$\Delta \Gamma_{\Delta f'_{об}} = \frac{1}{f'_{ок}} \Delta f'_{об} , \quad (2)$$

$$\Delta \Gamma_{\Delta f'_{ок}} = -\frac{f'_{об}}{(f'_{ок})^2} \Delta f'_{ок} . \quad (3)$$

Погрешность увеличения будет определяться среднеквадратическим отклонением (СКО) [3, 4]:

$$\Delta \Gamma_{СКО} = \sqrt{(\Delta \Gamma_{\Delta f'_{об}})^2 + (\Delta \Gamma_{\Delta f'_{ок}})^2} . \quad (4)$$

Для вычисления конкретных численных значений необходимо определить характеристики компонентов оптической системы. Предположим, что аттестация фокусных расстояний производилась с одинаковой относительной погрешностью измерений:

$$f'_{об} = 300 \text{ мм}, \Delta f'_{об} = \pm 3 \text{ мм (относительная погрешность } \pm 1 \text{ \%);}$$

$f'_{\text{ок}} = 30$ мм, $\Delta f'_{\text{ок}} = \pm 0,3$ мм (относительная погрешность ± 1 %).

Относительная погрешность увеличения определится следующим образом

$$\Delta \Gamma = \frac{\Delta \Gamma_{\text{СКО}}}{\Gamma} 100 \approx 1,4 \% . \quad (5)$$

Поскольку погрешность увеличения одной ветви бинокулярного прибора вычисляется по формуле (5), то для обеих ветвей погрешность можно определить на основе следующего выражения:

$$\Delta \Gamma_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta \Gamma_1)^2 + (\Delta \Gamma_2)^2} = \sqrt{1,4^2 + 1,4^2} = 1,97 \% . \quad (6)$$

Полученное значение соответствует техническим требованиям к бинокулярным приборам. В последующих рассуждениях важно учитывать, что относительная погрешность контроля фокусного расстояния объективов не должна превышать 1 %.

Вывод рабочей формулы устройства измерения

Для правильной работы измерительного модуля необходимо знание оптической схемы объектива, а именно номинальных (расчетных) фокусных расстояний оптических компонентов. Требуется номинальные (расчетные) фокусные расстояния оптических компонентов: первого $f'_{\text{ном}1}$, системы, состоящей из первого совместно со вторым компонентами $f'_{\text{ном сист } 1+2}$, системы, состоящей из первого совместно со вторым и третьим компонентами $f'_{\text{ном сист } 1+2+3}$ и так далее $f'_{\text{ном сист } 1+2+3+\dots+n}$.

Зависимость разницы фокусных расстояний от разности измеряемых величин x и x_1 определяется на основании рис. 1 с двумя изображенными оптическими компонентами - линзы HH' и H_1H_1' , который схематически иллюстрирует каждый из двух оптических каналов бинокулярного прибора. Разность их фокусных расстояний f' и f_1' обозначается как $\Delta f'$.

При разработке устройства и алгоритма обработки данных необходимо учитывать, что измеряется не фокусное расстояние напрямую, а производится подбор оптических компонентов так, чтобы разница их фокусных расстояний соответствовала заданному критерию. Этот метод измерения является косвенным и предполагает, что все компоненты соответствуют требованиям качества, но могут иметь отклонения в пределах допустимого диапазона. На рис. 1 расстояние l от задней главной плоскости до плоскости измерений рассчитывается на основе известного номинального значения первого оптического компонента $f'_{\text{ном}1}$, расстояния между узкими пучками лучей a и измеренного расстояния x [8].

Относительная погрешность [5]

$$\Delta f' = \frac{\Delta f'}{f'} 100, \% . \quad (13)$$

Симуляция расчетных процессов

На основе указанных выше данных выполняется симуляция расчетных процессов. Принимается, что номинальное фокусное расстояние объектива составляет $f'_{\text{НОМ}} = 150$ мм, а расстояние между пучками лучей $a = 20$ мм. Измеренные значения расстояний составляют $x = 6,555$ мм и $x_1 = 6,599$ мм.

На основании (8)

$$l = \frac{f'_{\text{НОМ}}(a - x)}{a} = \frac{150(20 - 6,555)}{20} = 100,875 \text{ мм} . \quad (14)$$

На основании (11)

$$f'_1 = f'_{\text{НОМ}} \frac{a - x}{a - x_1} = 150 \frac{20 - 6,555}{20 - 6,599} = 150,548 \text{ мм} . \quad (15)$$

Из (12):

$$\Delta f' = f'_{\text{НОМ}} - f'_1 = 150 - 150,548 = -0,548 \text{ мм} . \quad (16)$$

Из (13):

$$\Delta f' = \frac{\Delta f'}{f'_{\text{НОМ}}} 100 = \frac{0,548}{150} 100 \approx 0,36 \% . \quad (17)$$

Полученный результат подтверждает корректность выбора двух оптических компонентов в соответствии с условием, установленным для максимальной относительной погрешности в 1 %.

Алгоритм обработки результатов измерений

На рис. 2 представлена принципиальная схема измерительно – комплектующего устройства, разработанная с учетом принципа работы устройства, описанного выше.

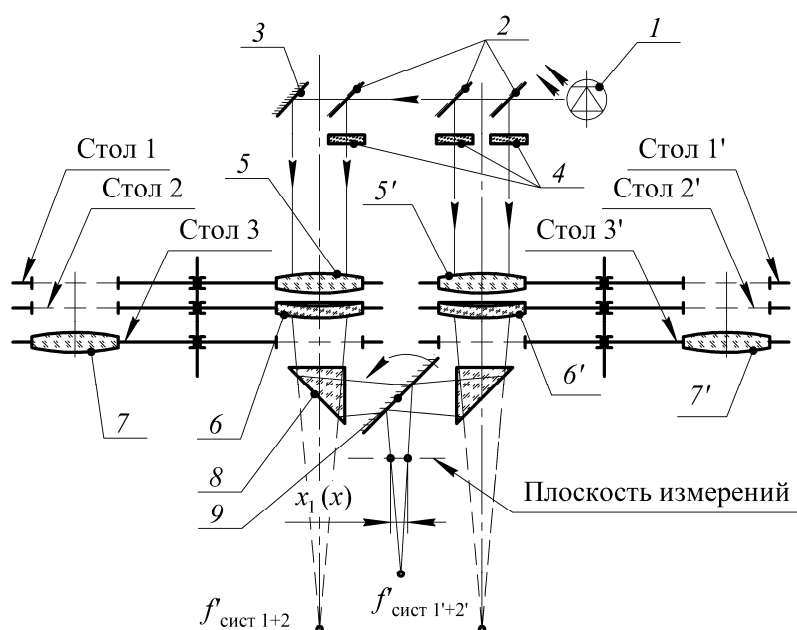


Рис. 2. Принципиальная схема измерительно-комплектующего устройства:

1 – источник излучения; 2 – полупрозрачные зеркала; 3 – зеркало; 4 – нейтрально-серые фильтры различной плотности; 5 – 7 – оптические компоненты объектива; 8 – призма; 9 – поворотное зеркало

Излучение от лазерного источника 1 направляется через систему зеркал 2 и зеркало 3, чтобы разделить пучок на четыре параллельных луча. Разница в световых потоках корректируется с помощью нейтрально-серых светофильтров 4 разной плотности. После этого лазерные лучи, отклоненные на 90° , проходят через первую линзу объектива 5, установленную на поворотном столике 1. В область измерения подается линза 5', также установленная на столике 1'. Производится измерение и последующее вычисление фокусных расстояний обоих оптических компонентов. Если результат отрицателен (при относительной погрешности разности фокусных расстояний линз более 0,36 %), линза заменяется на следующую. В случае положительного результата в область измерения подается линза 6, установленная на столике 2, и процесс повторяется с оставшимися линзами, установленными на столиках.

Оценка разности фокусных расстояний объективов производится с помощью пары лазерных лучей, прошедших через линзы объектива и отраженных от призмы 8 и поворотного зеркала 9 в плоскость измерения, где установлена ПЗС матрица.

На основе рассмотренных выше аспектов был разработан алгоритм обработки измеренных фокусных расстояний, которые могут быть вычислены, например, с использованием следующей формулы [9]:

$$f'_{\text{сист } 1+2} = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 - f'_2 - d}, \quad (18)$$

где d – расстояние между оптическими компонентами.
 Алгоритм обработки информации приведен на рис. 3.

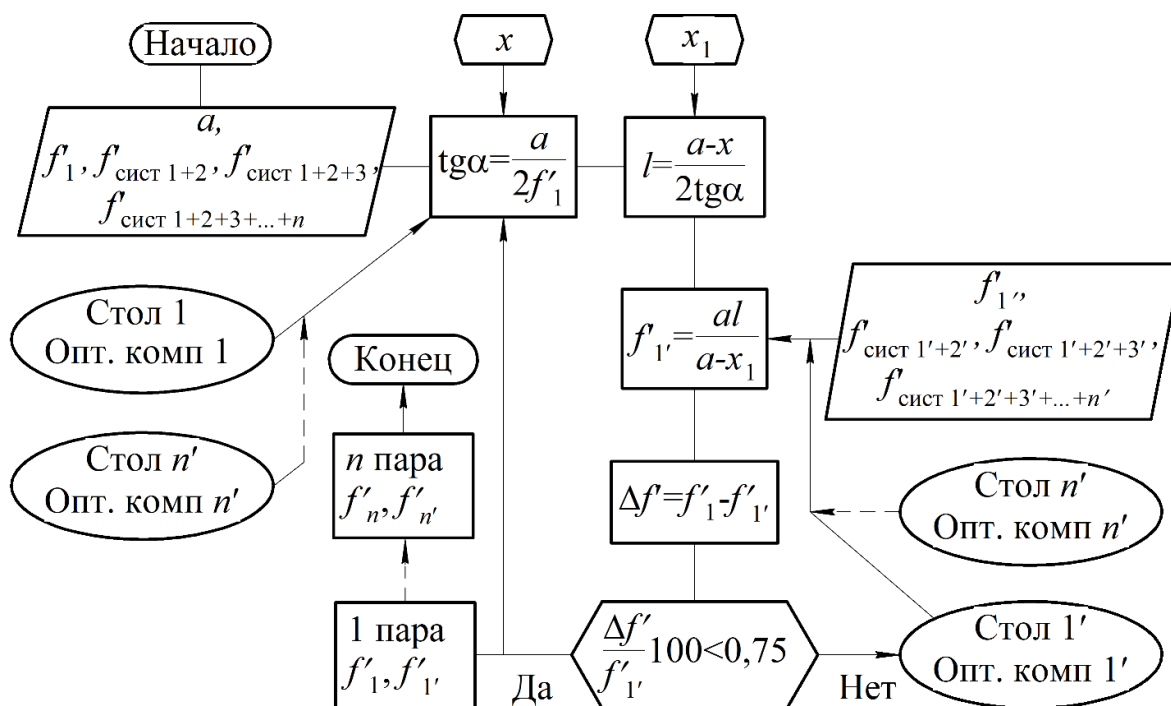


Рис. 3. Алгоритм обработки сигнала

Заключение

В настоящее время разработка приборов с селективным подбором компонентов представляется весьма перспективной задачей. Прибор, основанный на предложенной математической модели, позволяет комплектовать многокомпонентные объективы с характеристиками, максимально близкими к требуемым, что расширяет вариативность сборок и повышает их качество, уменьшая брак и исключая субъективный фактор человеческого влияния. Автоматизация процесса сборки увеличит производительность и сократит время выпуска продукции. Предложенная математическая модель, основанная на сравнении поперечных увеличений парных компонентов, обеспечивает автоматическое измерение с относительной погрешностью 0,36 % ($\pm 0,6$ мм от 150 мм), что соответствует требованиям, предъявляемых к бинокулярным приборам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 50909-96. Приборы визуальные наблюдательные. Требования безопасности и методы испытаний. – Введ. 01.04.1996. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 12 с.
2. ГОСТ 13095-82. Объективы. Методы измерения фокусного расстояния. – Введ. 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.
3. Еськова Л.М. Оптические измерения / учеб. пособие для вузов / Л. М. Еськова. – М.: Наука, 2003. – 129с.
4. Кузнецов А. К. Метрология / учебник для вузов / А. К. Кузнецов, А. Н. Исаев, И. И. Шайко. – М.: Наука, 2006. – 345с.

5. Креопалова Г. В. Оптические измерения / учебник для вузов / Г. В. Креопалова. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
6. МРТУ 3-525-67. Особенность оптических свойств бинокулярных приборов. – Введ. 1994 – 11 – 14. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 12 с.
7. Пизюта Б. А., Михайлов И.О. Новые оптико-электронные приборы для оптических измерений / учеб. пособие для вузов / Б. А. Пизюта, И. О. Михайлов. – Новосибирск: СГГА, 1996. – 77 с.
8. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов/ Г.В. Погарев. – М.: Машиностроение, 1978. – 98 с
9. Разработка и исследование аппаратуры для измерения основных характеристик оптических систем и приборов.: [сайт.] – URL: http://mikron.narod.ru/special/stati/dis_av_ref/index.htm (дата обращения: 04.15.2023). Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.
10. Шмурыгин Е. А., Михайлов И.О. Принципиальная схема устройства для селективного подбора оптических компонентов бинокулярных телескопических систем / Е. А. Шмурыгин, И.О. Михалов // ГЕО–Сибирь–2023 : сб. материалов VI Междунар.науч. конгр., 2023 г. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023 – Т. 6, ч. 2 – С. 63–69

© Е. А. Шмурыгин, И. О. Михайлов, 2024