



ЭЛ №ФС77-57961
ISSN:2313-8459

«КОНТЕНАНТ»

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 3, №4, 2021

*Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования.
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке.
Лицензионный договор №727-11/2014*

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2019 года.

СОДЕРЖАНИЕ

Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Игнатов А.Н., Никонов А.Б., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Насыров Р.К., Столяров А.В. Методы контроля формы поверхности и оптических параметров осевых крупногабаритных зеркал на этапе формообразования	2
Ильинский Р.Е., Семенов А.П. Анализ аберраций двухзеркальной оптической системы Дружина-Пуряева	20
Тимашова Л.Н., Фам Ван Чинь Методика синтеза оптической системы двухспектрозональной видеокамеры	30
А.М. Малхасян, М.Л. Белов Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации Левенберга-Марквардта и Нелдера-Мида для решения задачи фитинга в дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии	46
Никонов А. И. Оценка возможности применения некогерентного источника излучения для обнаружения нефтепродуктов на земной поверхности с использованием беспилотных летательных аппаратов	59
Вензель В.И., Семёнов А.А. Измерение основных параметров объективов в автоколлимационной схеме с использованием интерферометра	69

Выходит 4 раза в год

Журнал печатается при поддержке руководителей организаций и предприятий оптической промышленности и учебных заведений.

Редакционный совет:

Абдулкадыров Магомед Абдуразакович
Архипов Сергей Алексеевич
Бажанов Юрий Владимирович
Барышников Николай Васильевич
Бездидько Сергей Николаевич
Белов Михаил Леонидович
Кортаев Валерий Викторович
Лукин Анатолий Васильевич
Сеник Богдан Николаевич
Соколов Андрей Леонидович

Редакционная коллегия:

Барышников Николай Васильевич –
главный редактор
Иванов Сергей Евгеньевич
Ильянок Юлия Михайловна
Белокуров Евгений Александрович

Мнения, высказанные в материалах журнала, не обязательно совпадают с точкой зрения редакции.
Ответственность за содержание статей несут авторы.
При полной или частичной перепечатке ссылка на журнал «Контенант» обязательна.

Рукописи и фотографии не возвращаются.

Подписано в печать 7.02.2022
Статьи, подготовленные к изданию, передаются редакции электронного научно-технического журнала в издательство по электронной почте nukrlm@bmstu.ru для последующего размещения на сайте Диссертационного рецензируемого научно-технического журнала «Контенант» с последующей передачей по договору №727-11/2014 в Российский Индекс Научного Цитирования Научной Электронной Библиотеки.

Редакционная коллегия Диссертационного рецензируемого журнала «Контенант»

**ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТИВОВ В
АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ СХЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

Вензель В.И., Семёнов А.А.

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
г. Сосновый Бор.

E-mail: semenovaa@nioep.ru

Аннотация: Рассмотрены возможные схемы измерения основных параметров объективов в автоколлимационной схеме с использованием интерферометра. Приведен анализ погрешности измерений для рабочих длин волн 0,63, 3,39 и 10,6 мкм. Проведено сравнение экспериментально определенных погрешностей измерения параметров высокоапертурного объектива, работающего в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, с расчетными оценками погрешностей.

Ключевые слова: автоколлимационные методы, интерферометры, фокусное расстояние, дисторсия, кривизна поля, рабочий отрезок, диаметр входного зрачка, виньетирование.

**MEASUREMENT OF THE MAIN PARAMETERS OF OBJECTIVES IN AN
AUTOCOLLIMATION SCHEME WITH THE USE OF AN INTERFEROMETER**

Venzel V.I., Semenov A.A.

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering
Sosnovy Bor

E-mail: semenovaa@nioep.ru

Abstract: Possible schemes for measurement of the main parameters of objectives in an autocollimation scheme with the use of an interferometer are reviewed. The analysis of the measurement error for operating wavelengths of 0.63, 3.39 and 10.6 μm is given. The comparison of experimentally determined measurement errors for parameters of high-aperture objective, that works in the mid-infrared spectrum, with estimated measurement error values is made.

Keywords: autocollimation methods, interferometers, focal length, distortion, field curvature, flange focal distance, entrance pupil diameter, vignetting.

Введение

Методы измерения основных параметров объективов (фокусного расстояния, дисторсии, кривизны поля, заднего и рабочего отрезка, диаметра входного зрачка, виньетирования) описаны в действующих ГОСТах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. В большинстве случаев измерения производятся на установках, снабженных коллиматорами.

Наряду с коллимационными методами измерений существуют автоколлимационные методы измерений, например, измерение дисторсии [3, 8], фокусного расстояния [9], имеющие менее широкое распространение. Развитие этих методов не теряет актуальности, поскольку, обладая высокой точностью, они требуют меньше затрат, особенно при контроле длиннофокусных объективов (не требуют применения длиннофокусных коллиматоров). При этом автоколлимационный метод измерений увеличивает чувствительность поперечных и продольных наводок.

С точки зрения метрологии коллимационный и автоколлимационный методы отличаются выраженной зависимостью погрешности измерений от аберраций измеряемого объектива, которые в автоколлимационной схеме удваиваются. Эта погрешность существенна при измерении параметров качества изображения (разрешения, концентрации энергии, функции передачи модуляции), однако, при контроле опtotехнических параметров погрешность измерений в основном зависит от погрешностей продольных и поперечных наводок, которые гораздо меньше зависят от собственных аберраций оптической системы. При определении параметров хорошо скорректированных объективов этим влиянием можно пренебречь.

Можно предложить автоколлимационные аналоги практически всех методов измерения основных параметров оптических систем, в том числе с применением интерферометров. При этом интерферометр используется не для измерения волновых аберраций объектива, а в качестве лазерного автоколлимационного микроскопа с отсчетом поперечных смещений по аберрационному коэффициенту наклона и продольных смещений по аберрационному коэффициенту дефокусировки.

Интерферометр является автоколлимационным прибором, обладающим высокой энергетической эффективностью и большим увеличением, а точность продольных и поперечных наводок интерферометра сравнима с точностью наводок микроскопа соответствующей апертуры и увеличения. Особенно эффективно применение интерферометров для измерения параметров объективов, работающих в ИК области

спектра. Это связано с относительно малым распространением ИК коллиматоров, ИК микроскопов, со сложностью получения высоких отношений сигнал/шум на регистрирующем приемнике ИК излучения при использовании тепловых источников света и одновременном выполнении требований нормативных документов по увеличению регистрирующей системы и дифракционному размеру тест-объектов [1].

Областью применения автоколлимационных методов измерения параметров объективов с использованием интерферометров может быть определение параметров лазерных и монохроматических объективов, объективов с малым хроматизмом, проверка значений параметров объективов на соответствие расчету на длине волны излучения лазера интерферометра, контроль параметров серийной продукции, которая имеет стабильные характеристики хроматизма.

Измерения параметров оптических систем производятся в автоколлимационной схеме, указанной на рисунке 1.

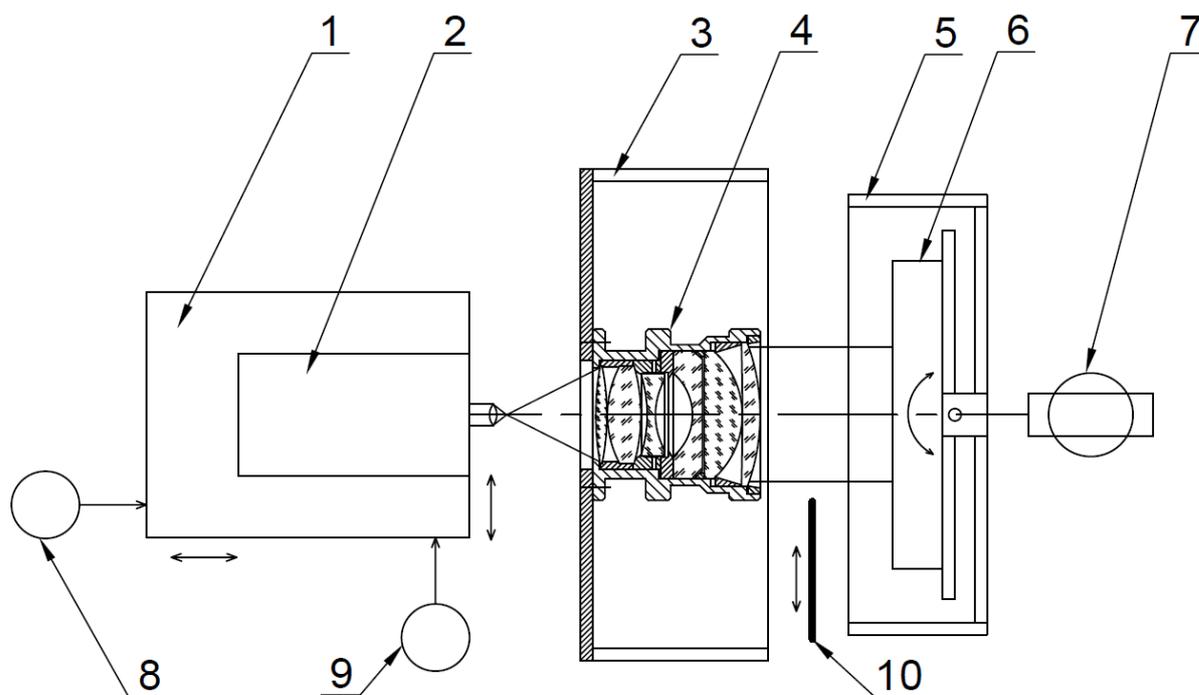


Рисунок 1 – Автоколлимационная схема измерения параметров объективов с помощью интерферометра. 1 – трехкоординатный стол, 2 – интерферометр, 3 – изделиедержатель, 4 – контролируемый объектив, 5 – держатель плоского зеркала, 6 – автоколлимационное плоское зеркало, 7 – теодолит, 8 – датчик продольных перемещений интерферометра, 9 – датчик поперечных перемещений интерферометра, 10 – экран для измерения светового диаметра

Параметры оборудования удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 58566-2019 «Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем». Диапазон изменения азимутального угла автоколлимационного плоского зеркала 6 составляет ± 15 угл. град. Чувствительность двухкоординатных подвижек зеркала 6 - ± 2 угл. сек. Погрешность изменения датчика угла – автоколлимационного теодолита 7 - ± 2 угл. сек. Диапазон перемещения трехкоординатного стола 1 по поперечной горизонтальной координате составляет 220 мм, дискретность измерений - 1 мкм. Непараллельность опорной плоскости изделиедержателя 3 и направляющих поперечной подвижки стола 1 не более 15 угл. сек.

В схеме могут использоваться три интерферометра:

- ФТИ-100 [10] на длину волны 0,63 мкм,
- ИКИ-3,5 [11] на длину волны 3,39 мкм,
- ИКИ-10 [11] на длину волны 10,6 мкм.

Измерение фокусного расстояния

Измерение фокусного расстояния производится угломерным способом. Вначале интерферометр 2 в центре поля зрения объектива 4 фокусируют продольным перемещением стола 1 до минимизации коэффициента aberrации дефокусировки d и настраивают на конечное число полос (12-15), контролируя коэффициент наклона L_0 . Затем автоколлимационное плоское зеркало 6 поворачивают с помощью держателя 5 на угол α , лежащий в параксиальной области, а интерферометр 2 поперечным перемещением трехкоординатного стола 1 смещают до получения начального количества полос на интерферограмме, контролируя поперечное смещение стола по датчику 9 и коэффициент наклона L_1 .

Фокусное расстояние f' испытуемого объектива определяют по формуле

$$f' = y / \operatorname{tg} \alpha,$$

где $y = \sqrt{N^2 + P^2}$ – смещение автоколлимационного изображения, мм; α – параксиальная область объектива, угл. град.; $N = (L_1 - L_0) \lambda K$ – изменение положения автоколлимационной точки относительно оси интерферометра, мм; P – смещение автоколлимационной точки по датчику, мм; L_0 – коэффициента наклона волнового фронта в центре поля; L_1 – коэффициента наклона волнового фронта в параксиальной области; λ – рабочая длина волны интерферометра, мм; K – диафрагменное число.

Относительная погрешность измерения фокусного расстояния составляет

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2},$$

где Δy – погрешность определения поперечного смещения автоколлимационного изображения, мм; $\Delta\alpha$ – погрешность определения угла наклона автоколлимационного плоского зеркала, угл. град.

Погрешность определения поперечного смещения автоколлимационной точки Δy составляет

$$\Delta y = \sqrt{2(\Delta N)^2 + \Delta P^2},$$

где ΔN – погрешность поперечного наведения интерферометра, мм; ΔP – погрешность датчика линейных перемещений, мм.

Погрешность поперечного наведения интерферометра ΔN прямо пропорциональна погрешности определения коэффициента наклона ΔL , длине волны λ и диафрагменному числу объектива K [12].

$$\Delta N = \Delta L \lambda K,$$

где ΔL – погрешность определения коэффициента наклона.

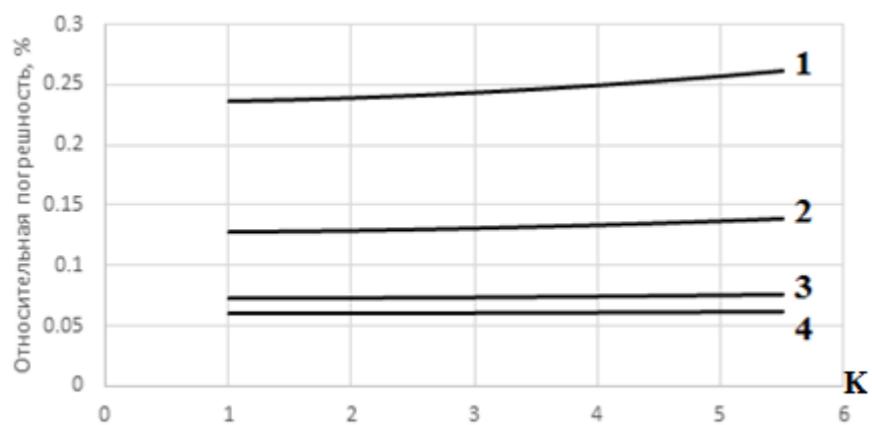
$$\Delta y = \sqrt{2(\Delta L \lambda K)^2 + \Delta P^2},$$

Формула относительной среднеквадратической погрешности определения фокусного расстояния принимает вид

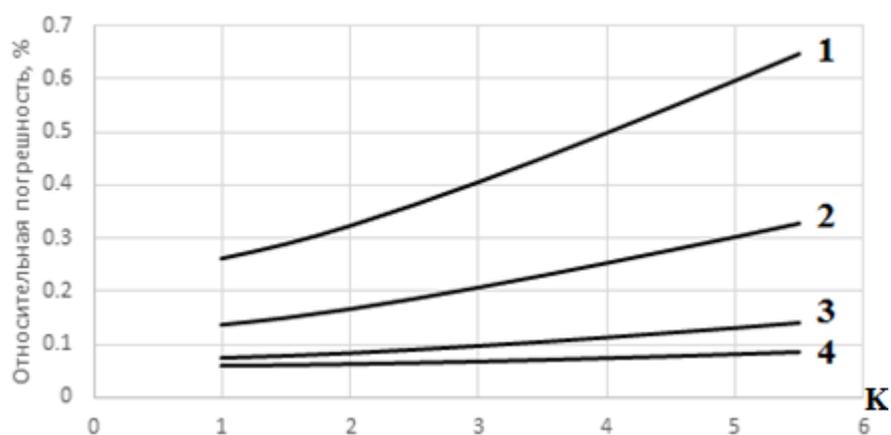
$$\frac{\Delta f'}{f'} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2(\Delta L \lambda K)^2 + \Delta P^2}}{y}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2}.$$

При расчетах погрешность определения коэффициента наклона ΔL волнового фронта принята равной 0,2. Погрешность определена экспериментально, путем усреднения погрешности определения L при многократной расшивке интерферограмм с определенным числом полос. Число полос изменялось от 12 до 15. Зависимость относительной погрешности определения фокусного расстояния контролируемого объектива от фокусного расстояния, диафрагменного числа объектива и длины волны имеет вид, показанный на рисунке 2.

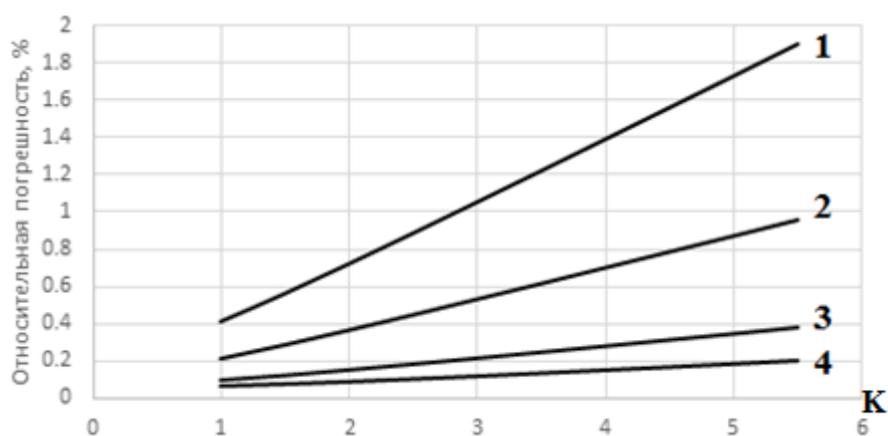
На рисунке 2 исходные данные: параксиальная область 1 угл. град., погрешность датчика линейных перемещений $\Delta P=2$ мкм, погрешность теодолита $\Delta\alpha=2''$.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Зависимости относительной погрешности измерения фокусного расстояния объектива от диафрагменного числа и фокусного расстояния на длинах волн 0,63 мкм (а), 3,39 мкм (б) и 10,6 мкм (в), где 1 – $f' = 50$ мм, 2 – $f' = 100$ мм, 3 – $f' = 250$ мм, 4 – $f' = 500$ мм

На рисунке 3 приведена зависимость относительной погрешности измерения фокусного расстояния от величины параксиальной области для различных длин волн. Исходные данные: $f'=50$ мм, $K=2$.

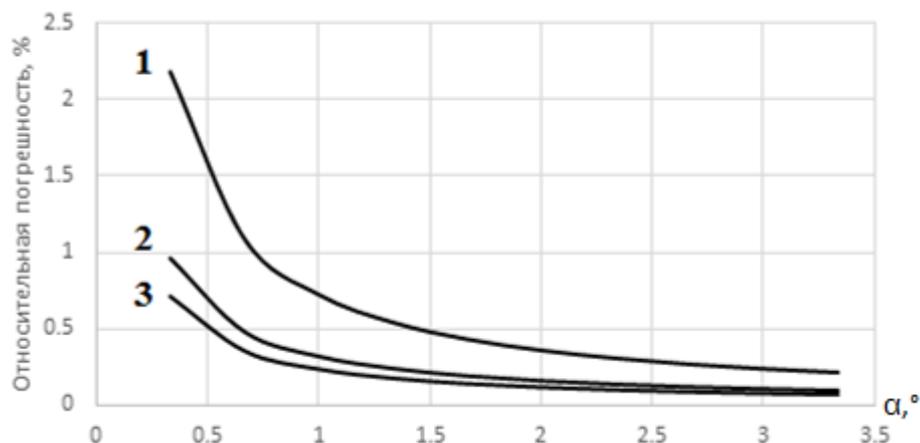


Рисунок 3 – Зависимость относительной погрешности измерения фокусного расстояния от величины параксиальной области и длины волны, где 1 – $\lambda=10,6$ мкм, 2 – $\lambda=3,39$ мкм, 3 – $\lambda=0,63$ мкм

Измерение дисторсии

Схема измерения дисторсии модифицирована для измерения дисторсии крупногабаритных объективов, поиск главной плоскости которых затруднителен [8].

Интерферометр 2 в центре поля зрения объектива 4 фокусируют до минимизации коэффициента aberrации дефокусировки d и настраивают на конечное число полос (12-15), контролируя коэффициент наклона L_0 .

Затем автоколлимационное плоское зеркало 6 поворачивают с помощью держателя 5 на угол α_i , а интерферометр 2 при помощи трехкоординатного стола 1 смещают до получения начального количества полос на интерферограмме, контролируя поперечное смещение по датчику 9 и коэффициент наклона L_i .

Величину дисторсии в i -той точке поля Δy_i можно определить по формуле

$$\Delta y_i = \frac{y_i - f' \operatorname{tg} \alpha_i}{f' \operatorname{tg} \alpha_i},$$

где Δy_i – дисторсия, отн. ед.; y_i – смещение автоколлимационного изображения, мм; f' – фокусное расстояние контролируемого объектива, мм; α_i – угол разворота автоколлимационного плоского зеркала при измерении дисторсии, угл. град.

Относительная среднеквадратическая погрешность определения дисторсии составляет

$$\frac{d(\Delta y_i)}{\Delta y_i} = \sqrt{\left(\frac{dy}{y_i - f'tg(\alpha_i)}\right)^2 + \left(\frac{y_i df'}{f'(y_i - f'tg(\alpha_i))}\right)^2 + \left(\frac{2y_i d\alpha}{\sin(2\alpha_i)(y_i - f'tg(\alpha_i))}\right)^2},$$

где $dy = \sqrt{2(\Delta L\lambda K)^2 + \Delta P^2}$ – погрешность определения смещения автоколлимационного изображения, мм; df' – погрешность определения фокусного расстояния, мм; $d\alpha$ – погрешность определения угла наклона автоколлимационного плоского зеркала, угл. град.

Если принять погрешность определения коэффициента наклона волнового фронта равным 0,2, то зависимость относительной погрешности определения дисторсии объектива от диафрагменного числа и фокусного расстояния примет вид, показанный на рисунке 4.

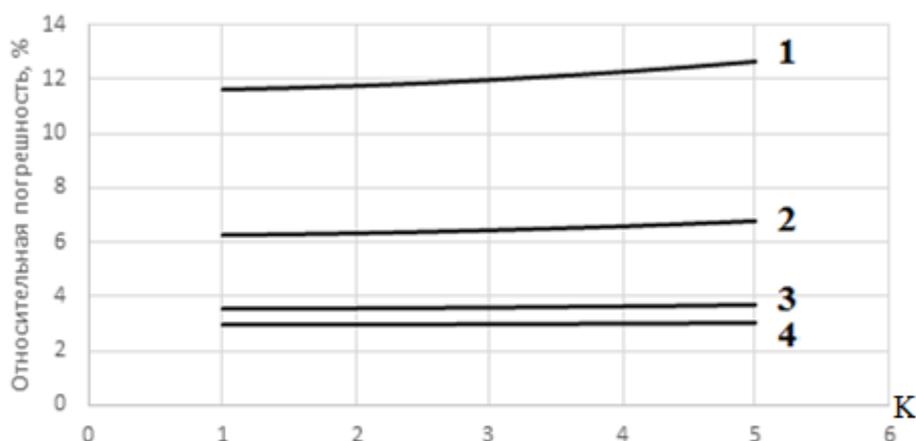


Рисунок 4 – Зависимость относительной погрешности определения дисторсии объектива от диафрагменного числа и фокусного расстояния, где 1 – $f'=50$ мм, 2 – $f'=100$ мм, 3 – $f'=250$ мм, 4 – $f'=500$ мм

Зависимость относительной погрешности от углового поля представлена на рисунке 5. Исходные данные $K=1$, $\lambda=0,63$ мкм, $\Delta y_i=2\%$.

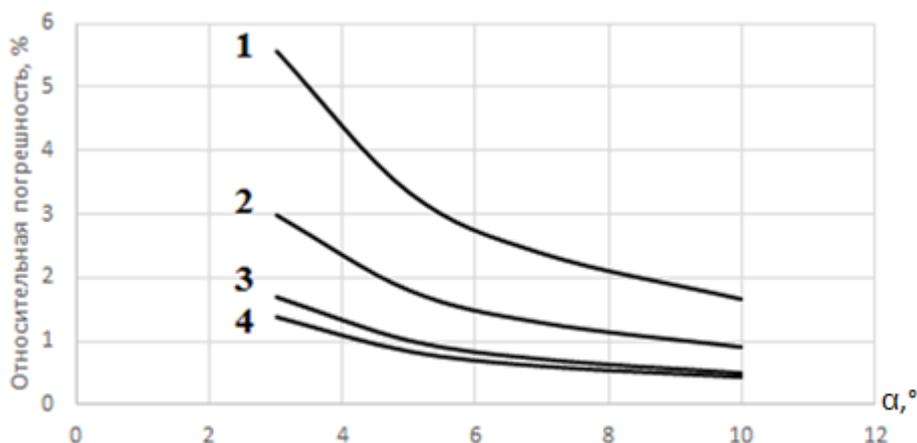


Рисунок 5 – Зависимость относительной погрешности от углового поля и фокусного расстояния, где 1 – $f'=50$ мм, 2 – $f'=100$ мм, 3 – $f'=250$ мм, 4 – $f'=500$ мм

Измерение кривизны поля

При измерении кривизны поля в каждой точке поля определяют дефокусировку.

Погрешность продольного наведения интерферометра ΔZ прямо пропорциональна погрешности определения коэффициента дефокусировки Δd , длине волны λ и квадрату диафрагменного числа K объектива [12].

$$\Delta Z = 8\Delta d\lambda K^2.$$

При расчетах погрешность определения коэффициента дефокусировки Δd принята равной 0,05. Погрешность определена экспериментально, путем усреднения погрешности определения Δd при многократной расшивке интерферограмм с различной дефокусировкой.

Зависимость погрешности измерения кривизны поля от диафрагменного числа объектива и длины волны имеет вид, показанный на рисунке 6.

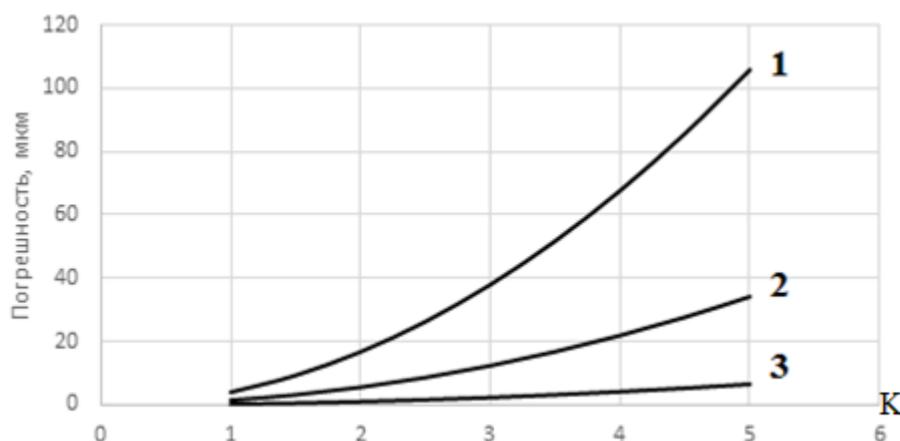


Рисунок 6 – Зависимость погрешности измерения кривизны поля от длины волны и относительного отверстия, где 1 – $\lambda=10,6$ мкм, 2 – $\lambda=3,39$ мкм, 3 – $\lambda=0,63$ мкм

Измерение заднего фокального и рабочего отрезков

Для определения заднего фокального отрезка объектива 4 интерферометр 2 вначале фокусируют путем совмещения фокальной точки объектива интерферометра с точкой фокуса контролируемого объектива 4 до минимума коэффициента дефокусировки d_1 . Затем фокусируют объектив интерферометра на вершину последней поверхности линзы объектива до минимума коэффициента дефокусировки d_2 , и измеряют перемещение интерферометра датчиком линейных перемещений, учитывая значение коэффициента дефокусировки.

Величина заднего фокального отрезка S'_F составляет

$$S'_F = P + Z,$$

где $S'_{f'}$ – задний фокальный отрезок, мм; P – значение перемещения по датчику линейных перемещений, мм; $Z=(8d_2\lambda K_{и}^2-8d_1\lambda K_{об}^2)$ – продольная наводка интерферометра в соответствии с изменением коэффициента дефокусировки, мм.; d_1 – коэффициент дефокусировки при наведении на фокальную плоскость объектива; d_2 – коэффициент дефокусировки при наведении на вершину первой поверхности объектива; $K_{об}$ – диафрагменное число контролируемого объектива; $K_{и}$ – диафрагменное число объектива интерферометра.

Погрешность измерения $\Delta S'_{f'}$ составляет

$$\Delta S'_{f'} = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Z_{об}^2 + \Delta Z_{и}^2},$$

где $\Delta S'_{f'}$ – погрешность измерения заднего фокального отрезка, мм; ΔP – погрешность датчика линейных перемещений, мм; $\Delta Z_{об}=8\Delta d\lambda K_{об}^2$ – погрешность продольной наводки интерферометра на фокальную плоскость, мм; $\Delta Z_{и}=8\Delta d\lambda K_{и}^2$ – погрешность продольной наводки интерферометра на вершину последней поверхности линзы, мм.

В соответствии с [1] диафрагменное число объектива интерферометра должно быть не менее чем на 20% меньше диафрагменного числа контролируемого объектива: $K_{об} < 0,8K_{и}$. Исходя из этого, рассмотрим худший вариант, когда

$$\Delta S'_{f'} = \sqrt{\Delta P^2 + 1,4\Delta Z_{об}^2}$$

Рабочий отрезок пересчитывается исходя из величины заднего отрезка и измеренному расстоянию от посадочного фланца до вершины последней поверхности линзы.

Если принять погрешность продольного наведения интерферометра Δd равным 0,05, то зависимость погрешности измерения заднего фокального отрезка от диафрагменного числа объектива и длины волны примет вид, показанный на рисунке 7.

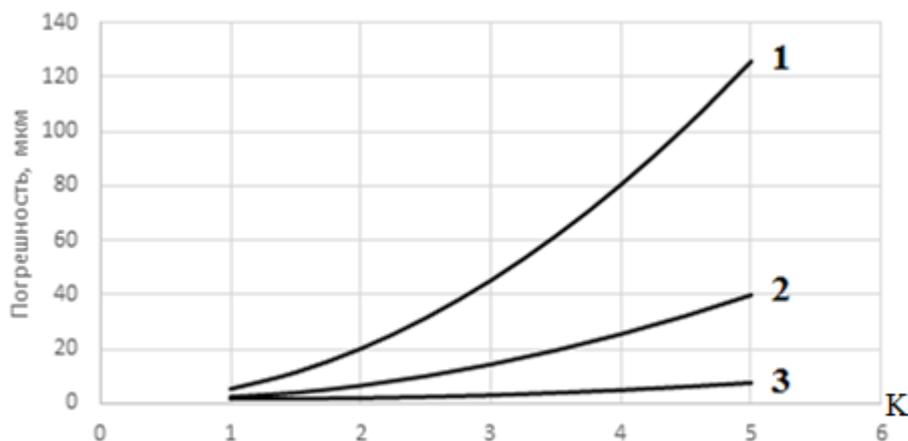


Рисунок 7 – Зависимость погрешности изменения заднего фокального отрезка от длины волны и диафрагменного числа, где 1 – $\lambda=10,6$ мкм, 2 – $\lambda=3,39$ мкм, 3 – $\lambda=0,63$ мкм

Измерение диаметра входного зрачка

При измерении диаметра входного зрачка в автоколлимационной схеме вблизи зрачка объектива 4 устанавливается экран 10 известного размера, а проекционная система интерферометра 2 фокусируется в плоскость входного зрачка для получения резкого края изображения зрачка. Опорный канал интерферометра при возможности необходимо перекрыть.

Диаметр входного зрачка можно определить по формуле

$$D=D'H/H',$$

где D – диаметр входного зрачка объектива, мм; D' – диаметр экрана, мм; H – количество пикселей в диаметре изображения зрачка; H' – количество пикселей в диаметре изображения экрана.

Количество пикселей в изображении зависит от увеличения системы интерферометр – испытуемый объектив и размера пикселя фотоприемника.

Относительная погрешность измерения диаметра входного зрачка равна

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{\left(\frac{dD'}{D'}\right)^2 + \left(\frac{dH}{H}\right)^2 + \left(\frac{dH'}{H'}\right)^2},$$

где ΔD – погрешность измерения диаметра входного зрачка, мм; dD' – погрешность измерения диаметра экрана, мм; dH – погрешность определения количества пикселей в изображении зрачка; dH' – погрешность определения количества пикселей в изображении экрана.

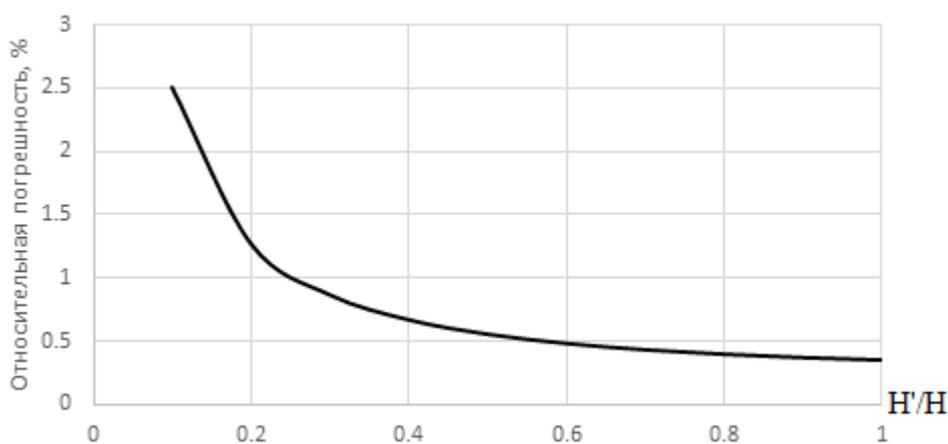
С учетом того, что размер экрана можно измерить с высокой точностью, погрешностью dD' при определении относительной погрешности диаметра зрачка можно пренебречь (рис. 8а).

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{\left(\frac{dH}{H}\right)^2 + \left(\frac{dH'}{H'}\right)^2}.$$

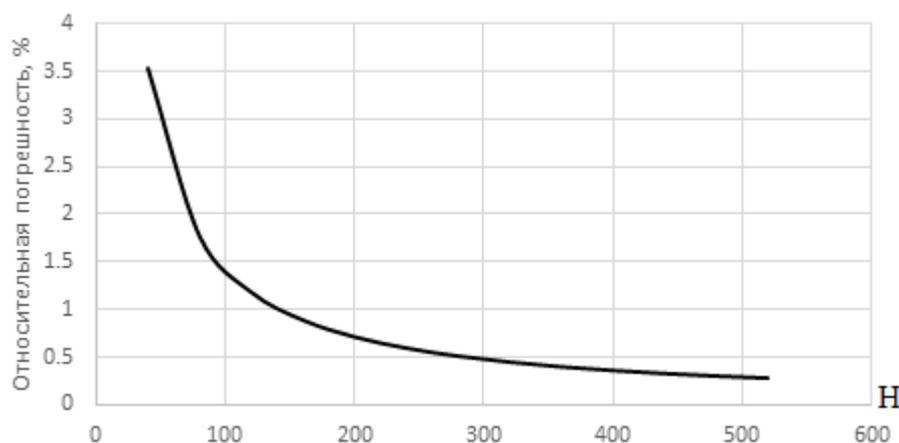
Вариант с минимальной погрешностью – размер экрана наиболее близок световому диаметру контролируемого объектива (рис. 8б). В этом случае формула примет вид

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{2\left(\frac{dH}{H}\right)^2}$$

Зададимся погрешностью измерения диаметра изображения в один пиксель. Зависимость погрешности измерения диаметра входного зрачка от количества пикселей в изображении и размера экрана представлена на рисунке 8.



а)



б)

Рисунок 8 – Зависимость относительной погрешности измерения диаметра входного зрачка от отношения размеров экрана и диаметра входного зрачка (а) и от числа пикселей в изображении (б)

Измерение виньетирования

При измерении виньетирования предварительно фокусируют проекционную систему интерферометра 2 на плоскость, близкую к входному зрачку объектива 4, для получения резкого края изображения зрачка.

Виньетирование K_Q определяют, как отношение площадей проекции зрачка на полевых точках к площади проекции зрачка в центре поля зрения

$$K_Q = ab/R^2,$$

где K_Q – виньетирование объектива; a – большая полуось изображения проекции выходного зрачка, пиксель; b – малая полуось изображения проекции выходного зрачка, пиксель; R – радиус изображения выходного зрачка в центре поля, пиксель.

Учитывая, что при малых значениях виньетирования $a=R$, упростим формулу

$$K_Q = b/a.$$

Относительная погрешность определения виньетирования составит

$$\frac{\Delta K_Q}{K_Q} = \sqrt{\left(\frac{db}{b}\right)^2 + \left(\frac{da}{a}\right)^2},$$

где ΔK_Q – погрешность определения коэффициента виньетирования; da – погрешность измерения большой полуоси изображения, пиксель; db – погрешность измерения малой полуоси изображения, пиксель.

Относительная погрешность определения коэффициента виньетирования зависит от количества пикселей в изображении и масштаба изображения. При погрешности измерения размера изображения в один пиксель зависимость погрешности измерений виньетирования от числа пикселей в изображении приведена на рисунке 9.

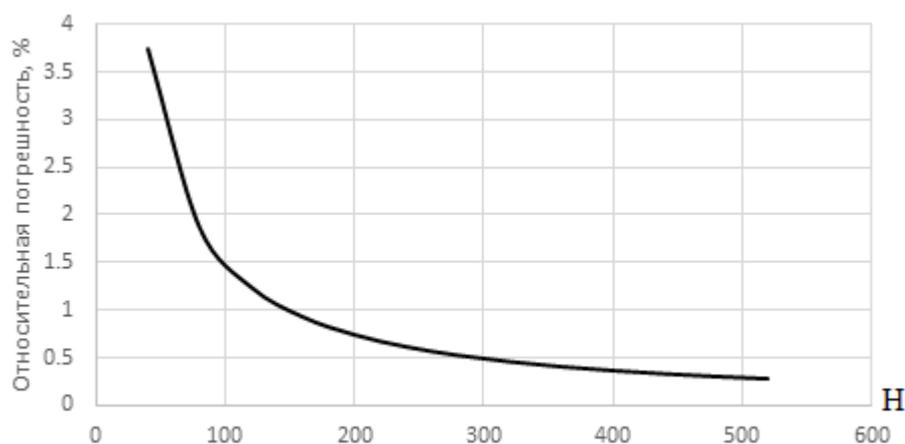


Рисунок 9 – Зависимость относительной погрешности измерений виньетирования от количества пикселей в изображении

Экспериментальное определение погрешности измерений

Для подтверждения корректности расчетных погрешностей были проведены эксперименты по определению среднеквадратической погрешности измерения основных параметров объектива среднего ИК диапазона с расчетным фокусным расстоянием $f'=183$ мм, относительным отверстием 1:1,25 и расчетным полем $2W=20^\circ$.

В экспериментах использовался ИК интерферометр ИКИ-3,5 на длине волны 3,39 мкм с объективом с относительным отверстием 1:1 [11].

Результаты сравнения расчетной оценки с экспериментально полученными данными приведены в таблице 1.

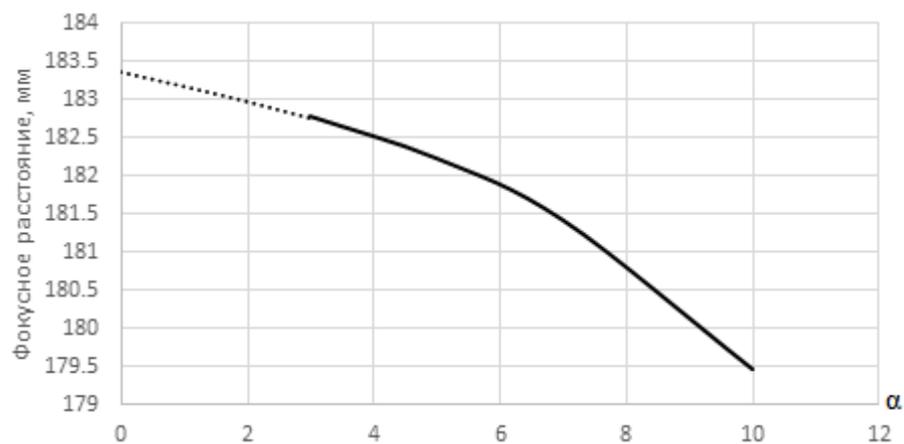
Таблица 1 – Сравнение расчетной оценки с экспериментально полученными данными

Измеряемый параметр	Расчетное значение	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Теоретическая погрешность
Фокусное расстояние, мм	183,39 мм	183,191	0,195	0,167
Дисторсия (поле 10°), %	1,94	2,0	0,074	0,09
Кривизна поля (на поле 7°), мкм	9	7	2	2
Задний отрезок, мм	18,921	18,924	0,002	0,003
Диаметр входного зрачка, мм	146,7	147,6	0,60	0,59
Виньетирование (на поле 10°), %	11	11	0,29	0,37

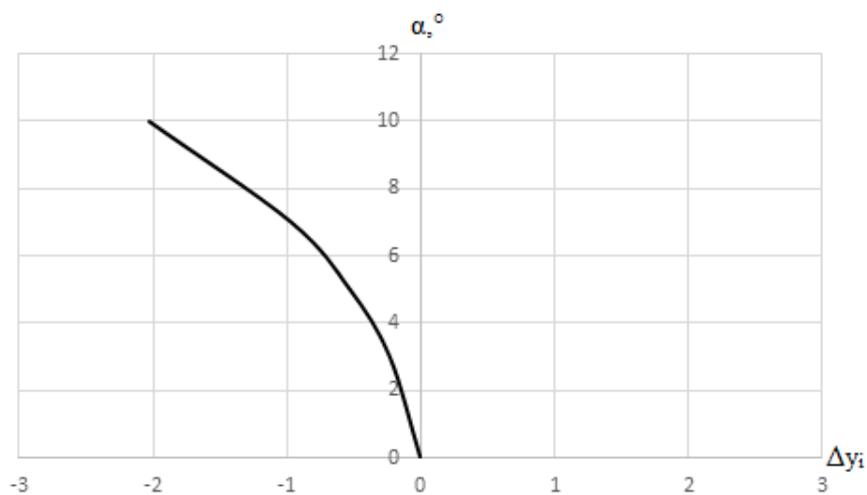
Также был проведен расчет паракиального фокусного расстояния в соответствии с [3]. Измерено фокусное расстояние в нескольких точках поля: 3, 5, 7, 10 угл. град. При полиномиальной аппроксимации третьей степенью определено значение фокусного расстояния в центральной точке поля $f'(0)=183,35$ мм и на поле 1 угл. град. $f'(1)=183,168$ мм.

Аппроксимированное значение ($f'(1)=183,168$ мм) отличается от измеренного ($f'=183,191$ мм) на 0,023 мм, что меньше погрешности измерений ($\Delta f'=0,167$ мм).

На рисунке 10 приведены графики зависимости фокусного расстояния и дисторсии от углового поля зрения.



а)



б)

Рисунок 10 – Зависимость фокусного расстояния (а) и дисторсии (б) объектива от угла поля зрения

Заключение

Показана возможность измерения основных параметров объектива в автоколлимационной схеме с использованием интерферометра.

Результаты экспериментов показали корректность расчетных оценок погрешности измерения основных параметров объективов.

В установке для контроля основных параметров объективов нами использованы измерительные приборы среднего класса точности. Получаемые при этом погрешности измерений удовлетворяют большинству применений объективов.

Литература

1. ГОСТ Р 58566-2019 / Оптика и фотоника/ Объективы для оптико-электронных систем/ М., Стандартизация/ 2019 г.
2. ГОСТ 13095-82/ Объективы/ Методы измерения фокусного расстояния/ М., Издательство стандартов/ 1988 г.
3. ГОСТ 20825-75/ Объективы съёмочные/ Методы измерения аберраций/ Метод измерения дисторсии/ М., Издательство стандартов/ 1975 г.
4. ГОСТ 23699-79 / Объективы съёмочные/ Методы измерения кривизны поля и астигматизма/ М., Издательство стандартов/ 1979 г.
5. ГОСТ 13096 -82 /Объективы/ Методы измерения рабочего и заднего отрезков/М., Издательство стандартов/ 1987 г.
6. ГОСТ 20828-81/Объективы/ Методы измерения диаметра входного зрачка/ М., Издательство стандартов/ 1981 г.
7. ГОСТ 24775-81 /Объективы/ Метод измерения виньетирования/ М., Издательство стандартов/ 1981 г.
8. Ган М.А., Скляр С.Н., Кушнарёв А.Г., Старков А.А., Ларионов С.А. / Метод интерферометрического контроля на рабочей длине волны качества изображения и дисторсии оптических систем/ Патент РФ №2491525/ 2013 г.
9. Ершов А.Г./Автоколлимационный метод измерения фокусного расстояния объектива/ Изв. Вузов/ Приборостроение, 2015 г., т.58, 37.
10. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н./Лазерный интерферометр ФТИ-100/ Интерэкспо Гео-Сибирь, 2013 г.
11. Вензель В.И., Горелов А.В./ Интерферометры среднего и дальнего инфракрасного диапазона спектра ИКИ-3,5 и ИКИ-10/ Оптический журнал/2008, №11, с.47
12. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. / Оптические измерения/ Часть 2. Теория оптических измерительных наводок/ Спб., ИТМО/2017 г.