

УДК 681.785.64

Анализ погрешностей интерференционного метода контроля длиннофокусных фокусирующих линз

© 2017 г. **М. А. Абдулкадыров***, канд. техн. наук; **Н. В. Барышников****, доктор техн. наук; **В. Е. Патрикеев***; **А. П. Семенов***, канд. техн. наук; **И. Н. Судариков***, аспирант

*Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино Московской обл.

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

E-mail: sudarikov@lzos.ru

Поступила в редакцию 16.02.2017

Интерференционный метод контроля длиннофокусных фокусирующих линз позволяет измерять такие оптические параметры как фокальные отрезки и искажения прошедшего через линзу волнового фронта. Высокая точность измерения достигается использованием специальной лазерной измерительной системы (лазерного трекера) в автоколлимационной схеме на базе динамического интерферометра. Выявлены основные источники инструментальной погрешности, а также определена их взаимосвязь с параметрами схемы измерения. Показано, что метод позволяет обеспечить суммарную инструментальную погрешность измерений порядка 0,003% от измеряемого значения величины.

Ключевые слова: фокальные отрезки, интерферометр, крупногабаритная линза.

Коды OCIS: 120.3180, 120.3930

ВВЕДЕНИЕ

Интерференционный метод контроля фокальных отрезков [1] позволяет проводить измерения параметров крупногабаритных линз с высокой точностью. В частности, для измерения фокальных отрезков линз пространственных фильтров мощных лазерных установок с фокусным расстоянием до 30 м допуск на изготовление составляет не более 30 мм, что определяет высокие требования к средству измерения. Применение автоколлимационной схемы с использованием интерферометра Тваймана–Грина (рис. 1), в которой фокус объектива интерферометра совпадает с фокусом контролируемой линзы, позволяет с высокой точностью позиционировать интерферометр относительно линзы. При этом значения искажений волнового фронта, регистрируемые интерферометром, служат критерием оценки степени совпадения фокуса объектива интерферометра и линзы.

Измерение фокального отрезка осуществляется путем измерения координат вершины линзы и ее фокуса с последующим определением расстояния между ними. Специальная лазерная измерительная система (лазерный трекер) с помощью уголкового отражателя позволяет с микронной

точностью определить координаты точек в пространстве, в частности координаты фокуса и вершины линзы.

Для достижения требований точности необходимо провести анализ источников погрешности средства измерения, определить их взаимосвязь с конструктивными параметрами измерительного оборудования, а также оценить вклад основных источников в общую погрешность.

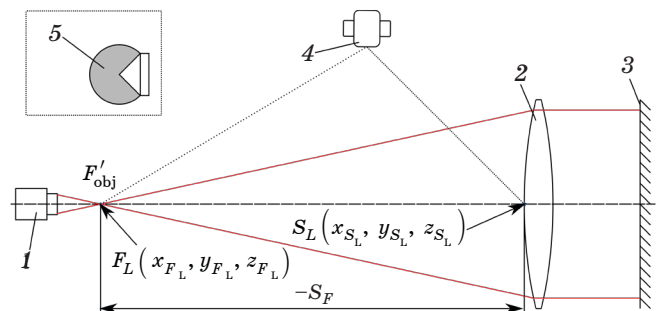


Рис. 1. Оптическая схема контроля фокальных отрезков. Интерферометр — 1, контролируемая линза — 2, плоское зеркало — 3, лазерный трекер — 4, уголкового отражатель — 5.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим схему, представленную на рис. 1. Оптическая схема контроля представляет собой автоколлимационную схему, что в совокупности с интерферометром позволяет с высокой точностью определить положение фокуса линзы F_L . Интерферометр 1 с источником излучения на длине волны 632,8 нм расположен таким образом, чтобы положения фокусов объектива интерферометра F'_{obj} и линзы 2 F_L совпадали. Плоское зеркало 3 обеспечивает автоколлимацию излучения. Предложенный метод измерения фокальных отрезков основан на измерении координат положения фокуса F_L и вершины линзы S_L с помощью лазерной измерительной системы (лазерного трекара) 4 — устройства, которое измеряет расстояние до объекта, его азимутальный угол и угол места относительно базовой системы координат трекара. В качестве средства измерения используется угловой отражатель 5, который возвращает лазерный луч трекара в обратном направлении, тем самым определяя расстояние от трекара до отражателя. Угловой отражатель имеет сферический металлический корпус со сферической поверхностью оптического качества, что повышает удобство его использования при измерении. По измеренным с помощью углового отражателя координатам точек F_L и S_L размер фокального отрезка может быть вычислен по формуле

$$S'_{F'} = \sqrt{(x_{F_L} - x_{S_L})^2 + (y_{F_L} - y_{S_L})^2 + (z_{F_L} - z_{S_L})^2}, \quad (1)$$

где x_{F_L} , y_{F_L} , z_{F_L} — координаты точки F_L , x_{S_L} , y_{S_L} , z_{S_L} — координаты точки S_L .

Необходимо отметить, что на практике вместо измерения фокального отрезка измеряется расстояние от вершины линзы до плоскости с наименьшей ошибкой дефокусировки (плоскость наилучшей фокусировки). Так как при изготовлении линз со сферическими поверхностями основными следствиями ошибок изготовления являются сферическая абберрация и астигматизм, то плоскости наилучшей фокусировки соответствует наименьшее значение проходящего через линзу волнового фронта, что подтверждается расчетом хода лучей и практикой. Поэтому в дальнейшем под точкой F_L будем понимать точку, лежащую в плоскости наилучшей фокусировки.

2. АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕЛИЧИН МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

При измерении фокального отрезка предлагаемым методом помимо погрешностей измерения трекара необходимо учитывать следующие погрешности: погрешность положения фокуса линзы F_L относительно фокуса F'_{obj} объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля, погрешно-

сти определения положения фокуса объектива интерферометра, координат вершины линзы и координат вершины и фокуса линзы в результате пересчета из локальных систем координат, указанных ниже, в систему координат лазерного трекара и обратно.

Некоторые из перечисленных погрешностей имеют не только случайную, но и систематическую составляющую, которую необходимо учитывать при проведении измерений. К таким погрешностям относятся следующие: систематические составляющие погрешностей положения фокуса линзы относительно фокуса объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля Δ_{sch} и определения положения фокуса объектива интерферометра Δ_{ot} , а также погрешность определения координат вершины линзы Δ_S .

Рассмотрим систематическую составляющую погрешности положения фокуса линзы относительно фокуса объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля Δ_{sch} .

Согласно схеме, представленной на рис. 1, критерием совмещения точек F'_{obj} и F_L является расстояние Δ_{sch} между ними вдоль оптической оси.

Ясно, что при наличии расстояния Δ_{sch} между точками F'_{obj} и F_L прошедший через линзу 2 и отраженный в обратном направлении волновой фронт фокусируется в точке на расстоянии $2\Delta_{sch}$. Тогда формула Гаусса приобретает следующий вид:

$$\frac{1}{f'_{obj} + 2\Delta_{sch}} - \frac{1}{R} = \frac{1}{f'_{obj}}, \quad (2)$$

где f'_{obj} — фокусное расстояние объектива интерферометра, R — радиус кривизны волнового фронта, прошедшего через объектив интерферометра в обратном направлении.

Тогда стрелка прогиба волнового фронта s определяется выражением

$$s = \frac{D^2}{8R}. \quad (3)$$

Здесь D — диаметр пучка волнового фронта, прошедшего через объектив интерферометра в обратном направлении, определяемый как

$$D = D_L \frac{f'_{obj}}{f'_L}, \quad (4)$$

где D_L — диаметр линзы.

Путем преобразования формул (2)–(4) с учетом стрелки прогиба, выраженной в длинах волн ($s = N_{sch}\lambda$), получим выражение для систематической составляющей погрешности положения фокуса линзы относительно фокуса объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля

$$\Delta_{sch} = \frac{-4\lambda N_{sch} f'^2_L f'_{obj}}{D_L^2 f'_{obj} + 8\lambda N_{sch} f'^2_L}, \quad (5)$$

где f'_L — фокусное расстояние контролируемой линзы, λ — длина волны излучения лазера, N_{sch} — дефокусировка, выраженная в длинах волн, которая определяется как математическое ожидание значений N_{sch} по серии измерений.

Рассмотрим систематическую составляющую Δ_{ot} погрешности определения положения фокуса объектива интерферометра.

Схема измерения положения фокуса объектива интерферометра представлена на рис. 2. Здесь уголкового отражателя 1 расположен в точке фокуса объектива интерферометра 2. Благодаря сферическому корпусу отражателя обеспечивается точное расположение последнего в фокусе объектива интерферометра. В этом случае погрешность Δ_{ot} представляет собой расстояние вдоль оптической оси между центром отражателя C_{ot} и фокусом объектива интерферометра.

Критерием точности служит значение дефокусировки N_{ot} , которая является следствием существования разницы стрелок прогиба между радиусом отражателя трекера и радиусом кривизны волнового фронта излучения интерферометра в точке падения на поверхность отражателя, выраженной в длинах волн,

$$\frac{d^2}{8(D_{ot}/2)} - \frac{d^2}{8(D_{ot}/2 - \Delta_{ot})} = \frac{N_{ot}\lambda}{2}. \quad (6)$$

Здесь D_{ot} — диаметр сферического корпуса отражателя трекера, d — диаметр пучка лазерного излучения на поверхности отражателя трекера, который может быть описан выражением

$$d = \frac{D_{obj}}{2f'_{obj}}(D_{ot} - 2\Delta_{ot}). \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в (6), преобразовав и решив квадратное уравнение относительно Δ_{ot} , получим зависимость систематической составляющей погрешности определения положения фокуса объектива интерферометра Δ_{ot} от дефокусировки N_{ot}

$$\Delta_{ot} = \frac{D_{ot}}{4} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{32N_{ot}\lambda f'^2_{obj}}{D_{ot}D_{obj}^2}} \right], \quad (8)$$

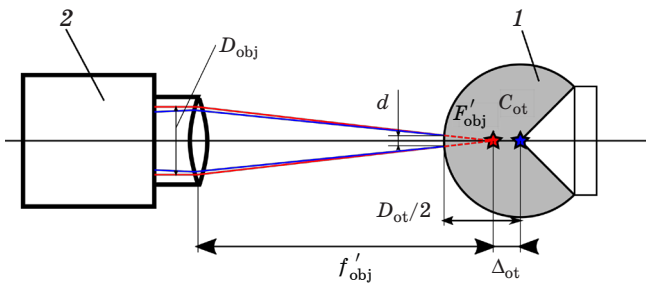


Рис. 2. Схема измерения координат фокуса линзы. Уголкового отражателя — 1, интерферометра — 2.

где Δ_{ot} — расстояние между фокусом объектива интерферометра и центром отражателя трекера, D_{obj} — световой диаметр объектива интерферометра, N_{ot} — дефокусировка отраженного от отражателя трекера волнового фронта, выраженная в длинах волн и определяемая как математическое ожидание из серии измерений.

Стоит отметить, что второй корень квадратного уравнения также является действительным, но не имеет физического смысла, так как в этом случае погрешность Δ_{ot} становится сравнимой с полудиаметром отражателя трекера, что противоречит оптической схеме, представленной на рис. 2.

Далее рассмотрим систематическую составляющую погрешности определения координат вершины линзы Δ_S . В процессе измерения координаты вершины линзы уголкового отражателя касается поверхности линзы в точке S_L , поэтому при вычислении расстояния необходимо учитывать полудиаметр сферического корпуса отражателя.

Погрешность определения вершины линзы обусловлена тем, что отражатель трекера невозможно расположить строго в вершине линзы. Поэтому необходимо определить допустимую зону в центре апертуры линзы, в пределах которой вклад данной погрешности в бюджет ошибки будет несущественным. Рассмотрим схему, изображенную на рис. 3, где отражатель трекера расположен на расстоянии h от вершины линзы S_L .

В общем случае погрешность определения координат вершины линзы может быть представлена в виде

$$\Delta_S = l - l_0, \quad (9)$$

где l — расстояние, измеренное с помощью лазерного трекера, l_0 — расстояние между F_L и центром отражателя при его положении на оптической оси.

Геометрически можно показать, что

$$\Delta_S = s_1 + s_2, \quad (10)$$

где s_1 — стрелка прогиба окружности радиусом $R_1 + D_{ot}/2$ на расстоянии h_1 от оптической оси, s_2 — стрелка прогиба окружности радиусом l на расстоянии h_1 от оптической оси. Значения s_1 и s_2 определяются по формулам

$$s_1 = \frac{1}{2}(2R_1 + D_{ot}) - \sqrt{\frac{1}{4}(2R_1 + D_{ot})^2 - h_1^2}, \quad (11)$$

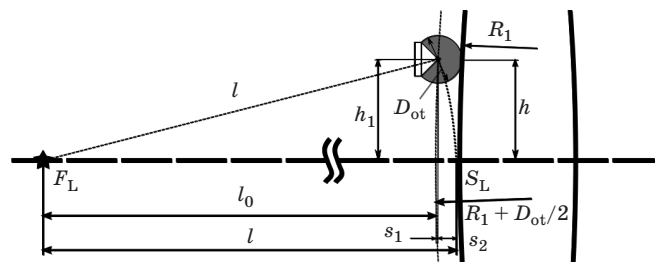


Рис. 3. Схема измерения координат вершины линзы.

$$s_2 = l - \sqrt{l^2 - h_1^2}. \quad (12)$$

Здесь h_1 — расстояние от центра отражателя C_{ot} до оптической оси. Ясно, что центр отражателя и точка его касания поверхности линзы лежат на прямой, перпендикулярной передней поверхности линзы радиусом R_1 . Можно показать, что h_1 и h связаны между собой следующим соотношением:

$$h_1 = \frac{R_1 + D_{ot}/2}{R_1} h. \quad (13)$$

Подставив формулы (11)–(13) в выражение (10) и проведя несложные преобразования, получим формулу расчета погрешности измерения координат вершины линзы Δ_S

$$\Delta_S = l \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(2R_1 + D_{ot})^2 h^2}{4R_1^2 l^2}} \right] + \frac{1}{2}(2R_1 + D_{ot}) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{h^2}{R_1^2}} \right], \quad (14)$$

где h — радиус допустимой зоны установки отражателя трека.

Полученное соотношение позволяет определить h в зависимости от радиуса контролируемой линзы и требуемой погрешности измерения. При многократном измерении расстояния от центра апертуры линзы до отражателя трека можно получить математическое ожидание значения h , что позволяет использовать формулу (14) для определения Δ_S как систематической составляющей погрешности измерения координат вершины линзы. Дисперсия значений h может быть использована при расчете случайной составляющей погрешности.

Таким образом, соотношения (5), (8) и (14) определяют систематические погрешности измерения фокального отрезка. Тогда формула (1) приобретает вид

$$S'_{F'} = \sqrt{(x_{F_L} - x_{S_L})^2 + (y_{F_L} - y_{S_L})^2 + (z_{F_L} - z_{S_L})^2} + D_{ot}/2 - (\Delta_{sch} + \Delta_{ot} + \Delta_S), \quad (15)$$

где D_{ot} — диаметр корпуса отражателя трека, который необходимо учитывать, так как в результате касания, центр отражателя трека C_{ot} находится на расстоянии $D_{ot}/2$ от поверхности линзы. Следует отметить, что при установке отражателей трека в указанных точках возможна разъюстировка схемы контроля, что приводит к появлению дополнительных погрешностей измерения. Это обуславливает необходимость дополнительной юстировки и, как следствие, дополнительной установки отражателя трека в точке F_L . Поскольку таких дополнительных юстировок за время контроля может быть несколько, процесс измерения существенно удлиняется.

Очевидно, что относительно интерферометра с установленным объективом положение точки F'_{obj} остается постоянным. Поэтому целесообразно задать локальную систему координат (ЛСК), которая будет жестко привязана к интерферометру.

Для реализации этого предложен следующий технический прием: на интерферометр устанавливаются три дополнительных отражателя трека, которые задают ЛСК интерферометра. Дополнительные отражатели трека жестко закреплены на интерферометре. В указанной ЛСК точка F'_{obj} имеет координаты, которые не меняются в процессе юстировки схемы контроля. Это позволяет измерить положение фокуса объектива интерферометра на предварительном этапе, а в процессе юстировки по необходимости измерять координаты дополнительных отражателей с целью восстановления ЛСК.

Схема построения ЛСК приведена на рис. 4. Локальная система координат задается тремя точками, в которых размещены отражатели по принципу «Начало координат — Ось — Плоскость». Например, точка M_1 принимается за начало координат ЛСК интерферометра l , точки M_1 и M_2 — задают одну из осей координат (i'), точки M_1 , M_2 , и M_3 — задают плоскость, ортогональную оси k' , а ось j' дополняет «тройку» до правой. Пересчет координат из системы координат трека 3 в ЛСК интерферометра осуществляется по формуле

$$F_{obj} M'_1 = M_F M_1 T. \quad (16)$$

Здесь $F_{obj} M'_1$ — вектор, проведенный из точки M_1 к фокусу объектива интерферометра в ЛСК интерферометра, T — матрица перехода, элементы которой вычисляются по формулам

$$i' = \frac{M_1 M_2}{|M_1 M_2|}, \quad k' = \frac{M_1 M_3 \times M_1 M_2}{|M_1 M_3 \times M_1 M_2|}, \quad j' = \frac{k' \times i'}{|k' \times i'|}, \quad (17)$$

где $M_1 M_2$ и $M_1 M_3$ — векторы, проведенные из точки M_1 к точке M_2 и из точки M_1 к точке M_3 соответственно.

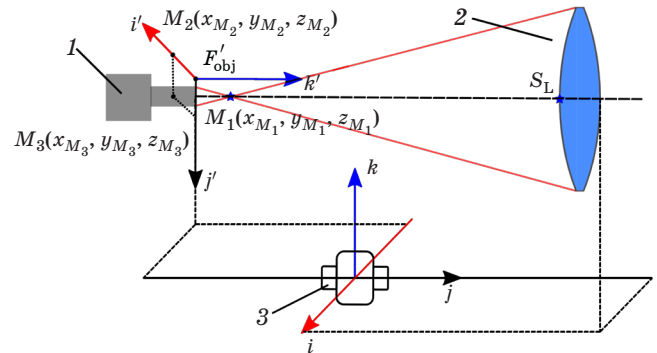


Рис. 4. Схема построения ЛСК. Интерферометр — 1, контролируемая линза — 2, лазерный трекер — 3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ

Исходя из определения погрешностей и их систематических составляющих, определенных в п. 2, случайная погрешность измерения фокального отрезка определяется по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_{sch}^2 + \sigma_{ot}^2 + \sigma_S^2 + 2\sigma_{LCS}^2}, \quad (18)$$

где σ_l — среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной погрешности измерения лазерной измерительной системы, σ_{sch} — СКО случайной погрешности положения фокуса линзы относительно фокуса объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля, σ_{ot} — СКО случайной погрешности определения положения фокуса объектива интерферометра, σ_S — СКО случайной погрешности определения координат вершины линзы, σ_{LCS} — СКО случайной погрешности определения координат вершины и фокуса линзы в результате пересчета из ЛСК, указанной выше, в систему координат лазерного трекера и обратно. Стоит отметить, что СКО погрешности пересчета ЛСК в формуле (8) удваивается, так как пересчет происходит дважды: первый раз при задании координат фокуса объектива интерферометра в ЛСК интерферометра, второй — при восстановлении координат фокуса объектива интерферометра из ЛСК в систему координат трекера.

Случайная погрешность измерения лазерной измерительной системы определяется погрешностями измерения дальности и углов поворота головки лазерного трекера. Для реализации предложенного метода контроля был выбран лазерный трекер API *Radian*, погрешность измерения координат которого составляет 10 мкм при измеренном расстоянии менее 10 м и 1 мкм при измеренном расстоянии более 10 м.

Случайные погрешности определяются статистическим моделированием по методу Монте-Карло [2], где по измеренным значениям математического ожидания и СКО случайных аргументов функций генерируется соответствующее распределение случайного аргумента. В нашем случае случайными являются функции, определенные по формулам (5), (8) и (14), а случайными аргументами — величины N_{sch} , N_{ot} и h . Путем их многократных измерений вычисляются математические ожидания и СКО этих величин, по значениям которых генерируются распределения значений случайных аргументов.

Количество генерированных значений превышает количество измерений величин N_{sch} , N_{ot} и h для того, чтобы их математические ожидания и СКО совпадали с измеряемыми. В нашем случае количество генерированных значений каждого из случайных аргументов составляет 10000.

Далее рассчитываются значения выражений (5), (8) и (14) от генерированных случайных значений

аргументов N_{sch} , N_{ot} и h и затем вычисляются их СКО, которые и являются случайными погрешностями.

Проведем оценку погрешности фокальных отрезков линзы с фокусным расстоянием 28 м и апертурой $D_L = 435 \times 435$ мм. Измеренное трекером расстояние $l = 28434,52$ мм.

Оценка погрешности проводилась при условиях, что лазерный трекер располагался между интерферометром и линзой на расстояниях $l_1 = 2,8$ м и $l_2 = 26,3$ м соответственно. При измерении координат точек с его помощью проводилось по 100 усреднений координат каждой точки.

Измерение координат фокуса и вершины линзы осуществлялось с использованием отражателя трекера диаметром 38,1 мм (1,5"). При этом дефокусировка N_{sch} схемы составила $-0,062^1$ при стандартном отклонении $\sigma_{N_{sch}} = 0,013$; результаты получены проведением 16 серий измерений, по 50 усреднений каждая. Дефокусировка N_{ot} отражателя трекера составила $-0,078$ при стандартном отклонении $\sigma_{N_{ot}} = 0,0008$; результаты получены при проведении 16 серий измерений, по 50 усреднений каждая.

При измерении координат вершины линзы отражатель трекера касается поверхности линзы в точке, расположенной на расстоянии $h = 30 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$ от центра апертуры. Координаты точек, задающих ЛСК, определялись с использованием отражателей диаметром 12,7 мм (0,5"). Погрешности децентрировки отражателей — положения вершины трехгранного угла от центра сферического корпуса отражателя, согласно паспортным данным составляют соответственно 0,00125 мм у отражателя диаметром 1,5" и 0,0057 мм у отражателей диаметром 0,5".

Систематическая составляющая Δ_{sch} погрешности положения фокуса линзы относительно фокуса объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля, вычисляемая по формуле (5), рассчитывалась для среднего значения дефокусировки $N_{sch} = -0,062$, указанного выше, и составила 0,369 мм. Путем статистического моделирования было получено СКО случайной погрешности $\sigma_{sch} = 0,076$ мм.

Аналогично с помощью выражения (8) была получена систематическая составляющая $\Delta_{ot} = -0,382$ мм. По результатам измерения значений $N_{ot} = -0,078$ и $\sigma_{N_{ot}} = 0,0008$ методом статистического моделирования было получено СКО случайной погрешности определения положения фокуса объектива интерферометра $\sigma_{ot} = 0,004$ мм.

Систематическая составляющая погрешности определения координат вершины линзы была

¹ Здесь и далее отрицательное значение дефокусировки соответствует выпуклой форме волнового фронта, положительное — вогнутой.

рассчитана по формуле (14), где расстояние от центра апертуры линзы до отражателя трекера было измерено линейкой, и получена следующая статистика: математическое ожидание составило $h = 30$ мм, СКО расстояния составило $\sigma_h = 3$ мм. В этом случае систематическая составляющая погрешности определения координат вершины линзы составила 0,015 мм, а СКО случайной погрешности — 0,003 мм. При статистическом моделировании σ_S , помимо случайной h , также участвует случайное значение радиуса поверхности линзы R_1 . Так как размер радиуса в конкретном случае составляет порядка 90 м, то СКО погрешности определения радиуса было принято равным 1000 мм, что многократно превышает точность измерения радиуса на современном оборудовании. Это позволяет сделать вывод о том, что в случае длиннофокусных линз влияние радиуса на СКО случайной погрешности σ_S несущественно.

Тогда в соответствии с формулой (15) размер фокального отрезка составил

$$S'_{F'} = \sqrt{(x_{FL} - x_{SL})^2 + (y_{FL} - y_{SL})^2 + (z_{FL} - z_{SL})^2} + D_{ot}/2 - (\Delta_{sch} + \Delta_{ot} + \Delta_S) = 28\,453,58.$$

При оценке случайной погрешности статистическим моделированием по методу Монте-Карло полагалось, что распределение случайных величин соответствует нормальному закону. Погрешность измерения лазерной измерительной системой в соответствии со спецификацией и измеряемой $l = 28\,434,52$ мм составляет $\sigma_l = 0,068$ мм.

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{0,068^2 + 0,076^2 + 0,004^2 + 0,003^2 + 2 \times 0,083^2} = 0,156 \text{ мм.} \quad (19)$$

Тогда суммарная инструментальная погрешность определяется согласно правилу 3σ и составляет ($3\sigma_\Sigma$) 0,468 мм.

Отсюда следует, что суммарная погрешность 0,468 мм линзы с фокальным отрезком 28 453,58 мм составляет 0,0016% от измеряемого значения.

Результаты измерений фокального отрезка еще 3-х линз и оценка погрешности по приведенной схеме представлены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 2 результатов контроля видно, что линза № 3 имеет наибольшую относительную погрешность. Это связано с тем, что при контроле линзы лазерный трекер располагался на

Оценка погрешности пересчета координат в ЛСК проводилась следующим образом. Были измерены координаты точек M_1 , M_2 и M_3 для задания ЛСК и фокуса объектива интерферометра и с учетом паспортных точностных характеристик прибора были смоделированы случайные значения координат. По формулам (17) был проведен пересчет координаты точки F_L в новую ЛСК и путем статистического моделирования получено стандартное отклонение положения точки относительно измененного значения. Для контроля линзы с фокусным расстоянием 28 м использовался объектив интерферометра с фокусным расстоянием 222 мм. Полученная погрешность пересчета координат составила $\sigma_{LCS} = 0,083$ мм.

Необходимо отметить, что случайная погрешность пересчета координат в ЛСК зависит от случайной погрешности измерения координат положений дополнительных отражателей лазерным трекером. То есть, чем дальше дополнительные отражатели находятся от трекера, тем выше случайная погрешность лазерной измерительной системы, следовательно, тем выше случайная погрешность пересчета ЛСК. Поэтому при измерении необходимо добиваться минимального расстояния трекера относительно фокуса объектива интерферометра.

Результаты расчета всех составляющих суммарной инструментальной погрешности приведены в табл. 1.

Полагая составляющие инструментальной погрешности независимыми величинами, суммарное СКО измеряемой величины может быть определено по формуле (18) [3]

Таблица 1. Оценка погрешностей измерения фокального отрезка

Погрешность	Значение
Погрешность измерения лазерной измерительной системой, мм	0,068
Погрешность продольной юстировки оптической схемы контроля, мм	0,076
Погрешность определения фокуса объектива интерферометра, мм	0,004
Погрешность определения вершины линзы, мм	0,003
Погрешность пересчета координат из ЛСК, мм	0,083

Таблица 2. Результаты измерений и оценка погрешности трех линз

Линза	Фокусное расстояние, м	Фокальный отрезок, мм	Δ_Σ , мм	Относительная погрешность, %
№ 2	28	28461,90	$\pm 0,529$	0,0019
№ 3	15	14682,38	$\pm 0,382$	0,0026
№ 4	15	14364,40	$\pm 0,247$	0,0017

расстоянии 7,5 м от интерферометра, в то время как при контроле остальных линз — на расстоянии менее 3 м.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были определены и проанализированы источники инструментальной погрешности при измерении фокальных отрезков интерференционным методом. Получены зависимости, позволяющие оценить вклад каждой из составляющих в общую погрешность, а также определить оптимальные условия их измерения для обеспечения требуемой инструментальной погрешности. С использованием полученных зависимостей были проведены измерения фокальных отрезков линз с фокусными расстояниями 28 и 15 м. По результатам измерений с использованием метода статистического модели-

рования получена суммарная погрешность измерения, не превышающая 0,003% от измеряемого значения.

По результатам проведенного исследования сделаны следующие выводы: основными источниками погрешностей являются погрешность лазерной измерительной системы (лазерного трекера), погрешность положения фокуса линзы относительно фокуса объектива интерферометра вдоль оптической оси схемы контроля и погрешность пересчета координат в локальную систему координат. Для минимизации погрешности измерения координат необходимо расположить лазерный трекер на расстоянии, соответствующем его минимальной погрешности измерения. При измерении координат вершины линзы погрешность их определения вносит несущественный вклад в суммарную погрешность, что позволяет расположить отражатель трекера с невысокой точностью в центре апертуры линзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Судариков И.Н., Шаров Ю.А.* Интерференционный метод контроля оптических параметров и фокальных отрезков крупногабаритных линз // *Контенант*. 2014. Т. 13. № 4. С. 93–96.
2. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. С. 161–173.
3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. С. 122–127.