ВЛИЯНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЩУПА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

М.Ф. Данилов, А.П. Иванова

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения

Рассматривается вопрос о погрешности координатных измерений параметров высокоточных оптических поверхностей зеркал. Основное внимание уделяется исследованию зависимости инструментальной погрешности от траекторных параметров перемещения щупа координатно-измерительной машины, разработке методик, обеспечивающих минимальную погрешность результатов.

Координатно-измерительные машины (КИМ) активно используются для технологического контроля оптических поверхностей в процессе их изготовления, аттестации геометрии детали, радиусов кривизны и асферических коэффициентов поверхностей [1]. Известно, что в задачах координатных измерений параметров высокоточных оптических поверхностей значительную роль играют инструментальные источники погрешностей [2], связанные с опорной системой координат, с узлами механической системы, с нарушением принципа Аббе [3], состоящего в том, что при расположении оси контролируемого объекта на продолжении оси эталонной отсчетной шкалы компаратора или параллельно ей ошибки измерения, вызванные несовершенством направляющих, имеют минимальные значения.

Особо подчеркивается [2], что не существует ни одной схемы КИМ, в которой не был бы нарушен хотя бы по двум осям принцип Аббе. Неизбежно возникающая вследствие этого погрешность возрастает с увеличением габаритных размеров КИМ и угловых отклонений подвижных узлов при их перемещении вдоль координатных осей.

Для уменьшения инструментальных погрешностей КИМ применяются методы компенсации [2], которые требуют для выявления действительных значений систематических погрешностей наличия средств измерения более высокого класса точности, чем КИМ. При отсутствии таких средств погрешность измерений может быть частично снижена за счет оптимального выбора траекторий перемещения щупа КИМ.

В настоящей работе рассматривается вопрос о погрешности измерения параметров высокоточных оптических поверхностей зеркал в процессе сборки объективов [4]. При этом основное внимание уделяется исследованию зависимости инструментальной погрешности от траекторных параметров перемещения щупа КИМ и разработке методик выполнения измерений (МВИ), обеспечивающих минимальную погрешность результатов.

Первоначально сбор данных – координат точек на сферической поверхности пробного стекла, осуществлялся с помощью КИМ в автоматическом режиме с использованием математической модели детали. Измерения проводились двумя способами: вдоль полярного радиуса по 8 точкам на 128 лучах и по 128 точкам на 8 окружностях с теми же полярными радиусами, что и в первом случае. Таким образом, измерения для обеих траекторий проводились в одних и тех же точках оптической поверхности. В дальнейшем значения координат измеренных точек экспортировали в текстовый файл в формате *xyzijk*, используемом в программе PC DMIS. Для оценки круглости сферической поверхности декартовые координаты преобразуем в сферические в системе координат с началом в центре сферы x_0, y_0, z_0 и из сферического радиуса каждой точки вычтем радиус сферы R_0

$$\Delta r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - R\,, \qquad (1)$$

где i = 1, 2…1024. Параметры сферы x_0, y_0, z_0, R определяются в программе PC DMIS методом наименьших квадратов. На рисунке 1 представлен график функции $\Delta r_i(n)$, построенный в соответствии с (1) для радиальной траектории перемещения щупа, здесь n – номер точки контроля.

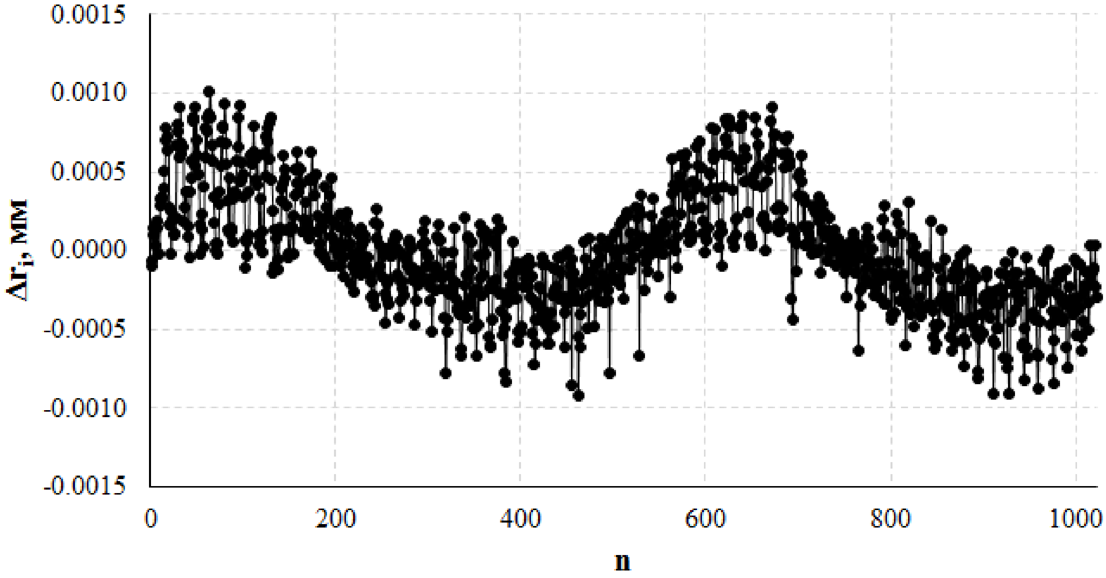

Рисунок 1. Отклонение радиуса точек контроля для радиальной траектории.

Кроме случайной составляющей на графике можно обнаружить регулярные изменения координат точек контроля с периодами приближенно равными 1/2 и 1/64 всего интервала наблюдения. Дискретное преобразование Фурье функции Δr_i (см. рисунок 2) подкрепляет этот вывод.

Рисунок 2. Амплитудный спектр отклонений радиуса
для радиальной траектории.

В спектре выборки видна вторая гармоника с максимальной амплитудой и периодом, равным ½ всего интервала наблюдения, связанная с низкочастотной модуляцией сигнала и две гармоники с номерами 62 и 66, что соответствует модуляции высокочастотного сигнала (биению частот). В отличие от классической амплитудной модуляции, когда в спектре присутствует несущая частота (64 гармоника) в нашем случае ее амплитуда значительно меньше амплитуд 62 и 66 гармоник.

На рис.3 представлен график функции $\Delta r_i(n)$, построенный в соответствии с (1) для круговых траекторий перемещения щупа.

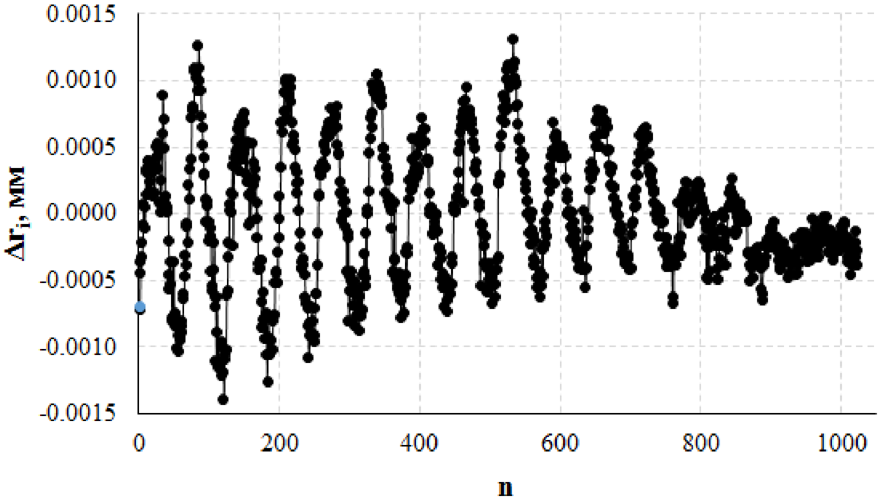

Рисунок 3. Отклонение радиуса точек контроля для круговых траекторий.

На графике отчетливо видно регулярное изменение координат измеренных точек с периодом приближенно равным 1/16 всего интервала наблюдения. Дискретное преобразование Фурье функции $\Delta r_i(n)$ (см. рисунок 4) подтверждает это наблюдение. В спектре выборки видна первая гармоника с периодом, равным интервалу наблюдения, связанная с уменьшением радиусов круговых траекторий, и более мощная гармоника с номером 16.

Рисунок 4. Амплитудный спектр отклонений радиуса
для круговой траектории.

Проанализировав возможные причины, можно сделать вывод, что в отличие от измерения геометрических параметров механических деталей с круглостью ~ 0.01 мм, полученный вид спектра связан с погрешностью средства измерения и характерными особенностями конкретной МВИ в части траектории контроля поверхности детали. Действительно, если в рассматриваемом случае погрешность изготовления оптической детали много меньше погрешности КИМ, а условия окружающей среды в процессе измерения изменяются незначительно, то можно сделать вывод, что наблюдаемая нами модуляция измеренных координат точек сферической поверхности связана с инструментальной погрешностью КИМ. При этом конкретный вид модуляции обусловлен параметрами траектории ощупывания точек поверхности головкой КИМ.

Наблюдаемое удвоение частот с периодами, равными ½ всего интервала наблюдения для радиальных траекторий, и удвоение частоты (16 вместо 8) для траектории перемещения щупа по 8 окружностям, объясняется с помощью математических моделей измерений радиуса точек контроля (1) на сферической поверхности, построенных с учетом нарушений принципа Аббе.

Примем, что все входящие в уравнение (1) величины измеряются с погрешностями

$$x_i = x_{i0} + \Delta x_i;\ x_0 = x_{00} + \Delta x_0;\quad y_i = y_{i0} + \Delta y_i;\ y_0 = y_{00} + \Delta y_0;$$
$$z_i = z_{i0} + \Delta z_i;\ z_0 = z_{00} + \Delta z_0;\quad R = R_0 + \Delta R. \qquad (2)$$

Здесь x_{i0}, x_{00}, y_{i0}, y_{00}, z_{i0}, z_{00}, R_0- действительные значения параметров; Δx_i, Δx_0, Δy_i, Δy_0, Δz_i, Δz_0, ΔR – соответствующие значения погрешностей. Отметим, что для действительных значений параметров справедливо уравнение сферической поверхности

$$\sqrt{(x_{i0} - x_{00})^2 + (y_{i0} - y_{00})^2 + (z_{i0} - z_{00})^2} = R_0\,. \qquad (3)$$

Оценим параметры Δr_i при перемещении щупа по круговым траекториям

$$x_{i0} - x_{00} = r_{0j}\cos\varphi_i,\qquad y_{i0} - y_{00} = r_{0j}\sin\varphi_i, \qquad (4)$$

где i – номер точки в выборке, j – номер круговой траектории.

При анализе составляющих инструментальной погрешности рассмотрим два крайних случая:

1. Δx_i, Δy_i, $\Delta z_i << \Delta x_0$, Δy_0, Δz_0, ΔR;
2. Δx_0, Δy_0, Δz_0, $\Delta R << \Delta x_i$, Δy_i, Δz_i.

Тогда для первого случая, подставляя (2) в (1), с учетом (3), (4), пренебрегая величинами второго порядка малости, получим

$$\Delta r_i = - r_{0j}\,(\Delta x_0\cos\varphi_i + \Delta y_0\sin\varphi_i)/R_0 - (1 - 0.5 r_{0j}^2/ R_0^2)\,\Delta z_0. \qquad (5)$$

При этом полагаем, что погрешности определения координат центра сферы Δx_0, Δy_0, Δz_0 являются константами, слабо зависящими от погрешности координат точек контроля Δx_i, Δy_i, Δzi. Они, главным образом, определяются характеристиками геометрических элементов детали в целом, что характерно, например, для плохо обусловленных задач координатных измерений [5]. В этом случае, как следует из (5), величина Δr_i будет изменяться по гармоническому закону с циклической частотой равной $2\pi\cdot 8$ и фазой, которая определяется отношением $\Delta x_0/\Delta y_0$.

Во втором случае, когда доминируют инструментальные погрешности КИМ, будем строить модель координатных измерений, исходя из того, что основной вклад в инструментальную погрешность вносят дефекты КИМ, связанные с нарушением принципа Аббе: угловые отклонения от прямолинейности направляющих; деформации опорной системы координат, недостаточная жесткость узлов, изменение взаимного положения узлов; погрешности выставления мер измерительных систем вдоль осей измеряемых перемещений, неперпендикулярность осей.

Эти дефекты приводят к тому, что погрешность измерений первого порядка по любой из трех координат будет зависеть от перемещений щупа по двум другим координатам. В случае, когда оптическая ось направлена вдоль координатной оси z, значимыми являются перемещения по координатам x и y, так как перемещения по координате z, обычно, малы по сравнению с перемещениями по этим координатам. Тогда

$$\Delta x_i = a_y r_0 \sin\varphi_i,\ \Delta y_i = a_x r_0 \cos\varphi_i, \qquad (6)$$

где a_y, a_x – коэффициенты пропорциональности, зависящие от угла между координатными осями. Подставляя (2) в (1), с учетом (3), (4), (6), пренебрегая величинами второго порядка малости, получим

$$\Delta r_i = r_{0j}^2\,((a_x + a_y)\sin\varphi_i\cos\varphi_i)/R_0 + (1 - 0.5 r_{0j}^2/ R_0^2)\,\Delta z_i. \qquad (7)$$

Отсюда легко видеть, что в случае перемещения щупа по круговым траекториям (4) погрешность измерения координат точек контроля на поверхности пробного стекла будет зависеть от произведения $\cos\varphi_i \cdot \sin\varphi_i = 0.5\sin 2\varphi_i$, что и вызывает наблюдаемое в эксперименте удвоение частот $2\pi \cdot 2 \cdot 8$.

Дальнейший анализ показывает, что оптимальными траекториями, обеспечивающими минимальные погрешности измерений координат точек сферической поверхности, являются траектории перемещений щупа в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль координатных осей КИМ, когда взаимное влияние перемещений по одной координатной оси на погрешность измерения координат по другой оси минимально, смотрите рисунок 5.

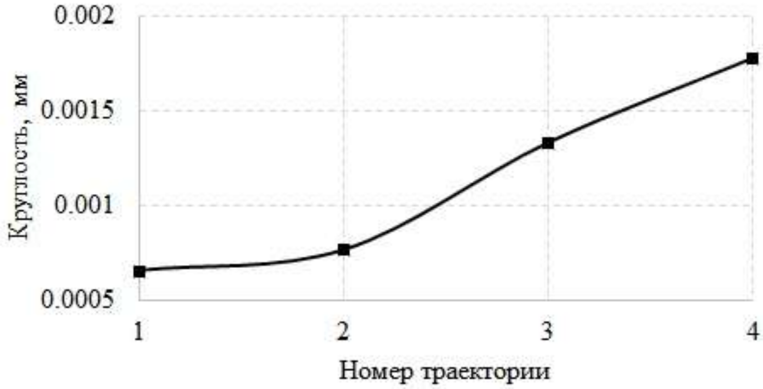

Рисунок 5. Результаты измерения круглости пробного стекла.
1 - вдоль координатных осей КИМ; 2 - под углом 45° к координатным осям;
3 - по окружностям; 4 - по радиусам.

Отметим, что при решении задачи первичного формообразования оптической поверхности методом локальной ретуши малоразмерным инструментом [1] необходимо получить топограмму поверхности с высоким пространственным разрешением и с максимальной точностью в каждой измеренной точке. При этом число точек контроля, в зависимости от размеров обрабатываемой зоны, может доходить до 1000. В нашем случае [4] для определения угловых и линейных децентрировок высокоточной оптической поверхности, как показывает опыт, достаточно небольшого числа точек, не превышающего 100.

Таким образом, систематическая составляющая погрешности координатных измерений высокоточной сферической поверхности, главным образом, является следствием нарушения принципа Аббе. Установлено, что траектории перемещений щупа в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль координатных осей КИМ обеспечивают наименьшие инструментальные погрешности измерения координат точек контроля.

Литература

1. Чекаль В.Н., Чудаков Ю.И., Шевцов С.Е. Применение координатно-измерительных машин для оптимизации технологии автоматизированного формообразования оптических поверхностей. Оптический журнал, 2008, том 75, № 11, с. 82 – 87.
2. Кононогов С.А., Лысенко В.Г. Координатная метрология: Монография. – М.: АСМС, 2010.
3. Гуриков В.А. Эрнст Аббе Изд. "Наука", М., 1985,
4. Вензель В.И., Данилов М.Ф., Савельева А.А., Семенов А.А. Применение координатно-измерительных машин для сборки осесимметричных двухзеркальных объективов с асферическими зеркалами. Оптический журнал, №2, 2019. С. 68 – 73.
5. Данилов М.Ф., Савельева А.А. Анализ исходных данных неустойчивых задач координатных измерений геометрических параметров деталей. Измерительная техника, № 6, 2018 г. С. 41 – 45.