АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ДЕТАЛЕЙ

С. А. РОДИОНОВ, В. В. УСОСКИН, И. П. АГУРОК

Описаны основные принципы автоматизации обработки результатов контроля оптических систем различными методами: интерферометрическим, Гартмана и т.д. Рассмотрен математический аппарат восстановления аберраций испытуемой системы по данным контроля с использованием методов математической статистики. Описана архитектура программной системы для ЕС ЭВМ, реализующей указанные методы.

Производство современных оптических приборов, обеспечение их высокого качества возможно только при условии кардинального усовершенствования методов исследования оптических систем как при изготовлении оптических деталей и узлов, так и всего прибора в целом. Это особенно важно для крупногабаритных оптических систем, в частности астрономических телескопов, при изготовлении которых значительный объем работы составляют операции контроля формы поверхностей оптических деталей при их изготовлении и аберраций телескопа в процессе его юстировки и аттестации.

Решение задачи стало возможным при автоматизированной обработке на ЭВМ результатов контроля, полученных различными методами, при этом, кроме получения необходимой и ранее недоступной полной информации о контролируемых системах, появляется возможность упростить многие схемы контроля, расширить допуски на юстировку измерительных приборов и эффективно применять методы, которые ранее не находили широкого применения из-за сложности интерпретации результатов (метод Гартмана, интерферометры сдвига и др.). Наконец, благодаря развитию автоматизированных методов, открывается возможность управления процессом ретуши поверхностей оптических деталей и процессом оптимальной юстировки оптических систем.

В настоящей статье описываются принципы построения автоматизированной системы обработки данных контроля оптических систем, реализованной в виде пакета программ для ЕС ЭВМ.

Весь процесс обработки может быть разбит на несколько связанных между собой этапов.

Первый этап – получение первичной информации. Эта информация состоит из двух различных групп, в первую из которых входит информация о номинальном состоянии схемы контроля и контролируемой системы: вид метода контроля (интерферометрический того или иного вида, метод Гартмана и т. д.), конструктивные параметры схемы контроля и контролируемой системы, длина волны излучения, в котором производится контроль. Перечисленные параметры являются постоянными для всех контролируемых объектов определенного типа и могут вводиться в систему один раз, при этом рационально воспользоваться банком данных, содержащим необходимые сведения о наиболее распространенных схемах контроля и контролируемых объектах. Информация первой группы служит для того, чтобы получить выражения, связывающие экспериментальные данные конкретной реализации контроля с контролируемой характеристикой объекта. В качестве таких характеристик выступают либо функция волновой аберрации контролируемой системы, либо отклонение формы контролируемой поверхности от номинала. Необходимые выражения могут быть получены аналитическим путем для простейших объектов, таких как одиночные астрономические зеркала или безаберрационные в номинальном положении оптические системы, для сложных систем требуется численное моделирование и последующая аппроксимация.

Вторая группа информации включает в себя собственно экспериментальные данные контроля. Для интерферометрических методов контроля это массив координат x_i, y_i центров интерференционных полос и соответствующий порядок полосы W_i, для метода Гартмана – координат x_i, y_i центров пятен на гартманограмме. В настоящее время эту информацию получают вручную на измерительных микроскопах и затем она подготавливается на машинных носителях (перфокартах); этот этап является наиболее трудоемким из всей обработки и здесь весьма перспективно применение специализированных автоматических измерений.

Второй этап – начальная обработка экспериментальной информации. Результатами выполнения этого этапа являются данные об ошибках исследуемой системы на множестве экспериментальных узлов в каноническом виде. Для интерферометрических методов здесь производится определение центра и величины апертуры испытуемой системы на интерферограмме, а также ориентация системы координат по реперным точкам и последующее приведение координат узлов x_i, y_i в каноническую форму ρ_{xi}, ρ_{xi} (нормирование к единичному кругу) с учетом дисторсии, вносимой схемой контроля и наклонами интерферограммы. Для метода Гартмана производится ориентация системы координат, уточнение неизвестных параметров схемы методом наименьших квадратов и получение из x_i, y_i значений поперечных аберраций $\Delta\eta_i$, $\Delta\xi_i$ в узлах ρ_{xi}, ρ_{yi}, причем координаты узлов на зрачке и поперечные аберрации приводятся в каноническом виде.

Третий этап является наиболее важным. Здесь производится аппроксимация исследуемой функции (волновой аберрации $W(\rho_x, \rho_y)$ по полученному на предыдущих этапах множеству значений связанных с ней величин) в узлах, т. е. значений некоторого оператора $D(W)$. В случае интерферометрического метода имеем значения самой волновой аберрации в узлах $D[W(\rho_{xi},\rho_{yi})]=W(\rho_{xi},\rho_{yi})$, в случае интерферограмм сдвига – разностной волновой аберрации $D[W(\rho_{xi},\rho_{yi})]=W(\rho_{xi}+a\rho_{yi})-W(\rho_{xi}-a\rho_{yi})$, в случае метода Гартмана – поперечных аберраций, равных частным производным волновой аберрации $D[W(\rho_{xi},\rho_{yi})]=\left[\frac{\partial W}{\partial \rho_x};\frac{\partial W}{\partial \rho_y}\right]$. Принципы аппроксимации являются общими для любых методов и основываются на методах математической статистики [1]. Искомая функция $W(\rho_x, \rho_y)$ представляется в виде разложения по некоторому базису, в качестве которого рационально выбрать ортогональные на зрачке полиномы Цернике [2,3]:

$$W(\rho_x, \rho_y) = \sum_{k=1}^{n} C_k P_k(\rho_x, \rho_y) \qquad (1)$$

Неизвестные коэффициенты аппроксимации C_k определяются методом наименьших квадратов из условия минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных величин оператора D в узлах аппроксимации от значений, получаемых аппроксимацией

$$\sum_{i=1}^{m} q_i^2 (D[W(\rho_{xi}, \rho_{yi}) - \sum C_k D[P_k(\rho_{xi}, \rho_{yi})])^2 = \left\| \mathbf{Q}^2 (\mathbf{Ac} - \mathbf{f}) \right\|^2 = \min \qquad (2)$$

где **c** – вектор неизвестных коэффициентов, **A** – матрица значений оператора D от функций базиса в узлах (конструкционная матрица), **f** – вектор значений экспериментальных данных в узлах, $\mathbf{Q}^2$ – матрица весов.

Условие (2), как известно, приводит к нормальной системе уравнений

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^2 \mathbf{Ac} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^2 \mathbf{f} \qquad (3)$$

из решения которой и находятся неизвестные коэффициенты **c**. Важным моментом здесь является выбор оптимального базиса, наиболее обусловленного на множестве узлов. Эта задача решается методами линейной алгебры и сводится к поиску наиболее линейно независимого в смысле заданного относительного допуска ε базиса матрицы $\mathbf{G} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^2 \mathbf{A}$, причем, как показывает практика, приемлемая величина ε колеблется в пределах 0,01 – 0,1. Решение системы (3) производится методом ортогонализации, при этом искомые коэффициенты c находятся через промежуточные коэффициенты **b** разложения $W(\rho_{xi}, \rho_{yi})$ по базису, значения оператора D от которого ортогональны на экспериментальном множестве узлов с единичными нормами:

$$\mathbf{c} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{b}; \qquad \mathbf{b} = (\mathbf{R}^{-1})^T \mathbf{A}^T \mathbf{f} \qquad (4)$$

где **R** – верхняя треугольная матрица ортогонализации, причем можно показать, что **R** – треугольный фактор матрицы **G**; $\mathbf{G} = \mathbf{R}^\mathbf{T}\mathbf{R}$. Такой прием позволяет на уровне коэффициентов **b**, благодаря их статистической независимости, проводить нормальный регрессионный анализ, для чего находится оценка дисперсии исходных данных $\hat{\sigma}^2 = \dfrac{S}{m-n}$, где S – остаточная сумма квадратов (2). Из-за ортонормированности базиса σ^2 есть также оценка дисперсии всех коэффициентов $\mathbf{b}_k$, так как они статистически независимы; регрессионный анализ заключается в проверке значимости каждого коэффициента $\mathbf{b}_k$ по критерию Фишера [1]. По найденным $\mathbf{b}_k$ легко находится также оценка дисперсии восстановленной функции W. Благодаря применению такого аппарата взамен применяемых в настоящее время методов интерполяции и численного интегрирования [2, 3], удается существенно уменьшить погрешность аппроксимируемой функции.

На последнем этапе по известной функции $W(\rho_x, \rho_y)$ производится оценка качества изображения исследуемой системы определением функции рассеяния точки (ФРТ), оптической передаточной функции (ОПФ) и других характеристик, а также решение вопроса о допустимости полученных ошибок. При этом из набора коэффициентов C_k исключаются ошибки, устраняемые юстировкой, и определяются рекомендации по оптимальной юстировке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Худсон Д. *Статистика для физиков*. – М.: Мир, 1970.
2. Mayall N. V., Vasileuskis. *Quantative Test of the Lick Observatory 120-Inch Mirror*. – Lick Observ. Bull., 1960, N 567, 304.
3. Rimmer M. P. *Method for Evaluating Latural Shearing Interfero-grams*. – Appl. Opt. 13, N 3. 1974, p.623.