

Физическая аппаратура

УДК 681.7.013.8

Принципы построения автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем

И. Р. Осипович

ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Россия

Рассмотрены особенности автоматизированного контроля качества изображения оптических систем методом частотного анализа изображения простого тест-объекта. Выявлены основные преимущества данного метода и проблемы его реализации. Даны рекомендации по минимизации причин погрешности измерений.

РАС: 06.30.-к; 07.50.-е

Введение

Повышение функциональности оптико-электронных приборов — тепловизионных систем, систем дистанционного зондирования Земли, прицельно-навигационных комплексов, медицинских приборов — сопровождается применением оптических систем (ОС) с качеством изображения, близким предельно достижимому уровню. Это усиливает роль стендовых исследований. Необходимость контроля как единичных систем, так и серийных образцов накладывает на такие стенды одновременно требования максимальной информативности контроля, минимальной погрешности измерений и высокой оперативности.

В настоящее время основными критериями оценки качества изображения сложных информационных ОС являются функции рассеяния точки (ФРТ) и передачи модуляции (ФПМ). Эти функции качества наиболее полно характеризуют ОС и позволяют оценить ее как самостоятельно, так и в составе прибора. Они несут информацию обо всех аберрациях ОС.

Оптимальный метод контроля должен обеспечивать:

хорошую алгоритмизацию, что позволяет автоматизировать управление стендом, обеспечить программный учет влияния его конструкции, а непосредственно измерения проводить без участия оператора;

минимизацию длительности измерительного цикла, обеспечения контроля за один прием всего диапазона пространственных частот;

возможность разнести во времени процесс получения первичной информации и процесс ее обработки.

Перечисленные выше факторы свидетельствуют в пользу методов частотного анализа ФРТ или функции рассеяния линии (ФРЛ) при их цифровой

обработке. Эти функции несут информацию сразу обо всех пространственных частотах и могут быть получены за один прием, что существенно сокращает время измерений.

Очевидным достоинством данного метода является простота его аппаратной реализации, в том числе и на существующей стендовой базе [1].

Принцип построения аппаратуры

Независимо от аппаратной реализации в основе метода лежит съемка распределения энергии в пятне рассеяния или в изображении тонкой линии. После вычета темнового фона оно нормируется, рассчитываются координаты его энергетического центра, с которым совмещается начало координат. Полученная функция представляет собой набор дискретных значений, взятый через период T . Величина T выбирается из теоремы Котельникова и должна удовлетворять условию $T < 1/2\nu'_m$, где ν'_m — предельная пространственная частота, передаваемая ОС.

Поскольку ФРТ аппроксимируется конечным числом дискретных отсчетов N , то и ФПМ будет выражаться через преобразование Фурье также в дискретной форме. В одномерном случае имеем:

$$\tilde{S}(\nu'_{xm}) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp\{-j2\pi\nu'_m kT\}, \quad (1)$$

где ряд частот выбирается на основе соотношения $\nu'_m = m/NT$.

Здесь $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$;

$m = 0, 1, 2, \dots$ — номер дискретного значения пространственной частоты (гармоники).

Выражение (1) содержит в себе и амплитудную, и фазовую составляющие оптической передаточной функции.

Для нахождения ФПМ раскроем выражение (1) с использованием формулы Эйлера, найдем модуль и нормируем его на нулевой пространственной частоте:

$$|\tilde{S}_m| = \frac{\sqrt{\left(\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)\right)^2}}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}} \quad (2)$$

Именно выражение (2) лежит в основе алгоритмов управляющих программ для автоматизированных средств контроля ФПМ.

Замечание: в настоящее время производительность компьютеров стала такой, что алгоритм преобразования Фурье перестал быть определяющим фактором быстродействия всей системы обработки результатов. Для обеспечения производительности гораздо важнее оптимизация алгоритмов и программной реализации быстрого доступа к пикселям изображения, снимаемого с матричных приемников.

Влияние пары тест-объект — анализатор изображения

Особенности аппаратной реализации измерительных средств сильно зависят от того, что выбрано в качестве пары тест-объект — анализатор изображения. Если оптическая система установки предусматривает использование коллиматора со слабыми светознергетическими характеристиками, например схему со светоделителем, то целесообразно в качестве тест-объекта использовать раздвижную щель несмотря на необходимость дополнительных поворотных механизмов для переключения между сечениями [1].

Целевой тест-объект позволяет использовать в качестве анализатора высокочувствительные спектральные ПЗС-линейки, пороговая чувствительность которых измеряется фотонами.

С другой стороны, полная информация сразу обо всем пятне рассеяния получается при использовании тест-объекта в виде круглой диафрагмы и матричного анализатора. Такой выбор целесообразнее, если потери энергии в коллиматоре невелики. В качестве примера на рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема малогабаритной установки для контроля ФРТ и ФПМ оптических систем, работающих как из бесконечности, так и с конечного расстояния (на рис. 1 показано пунктиром), на рис. 2 показан интерфейс ее управляющей программы 2.

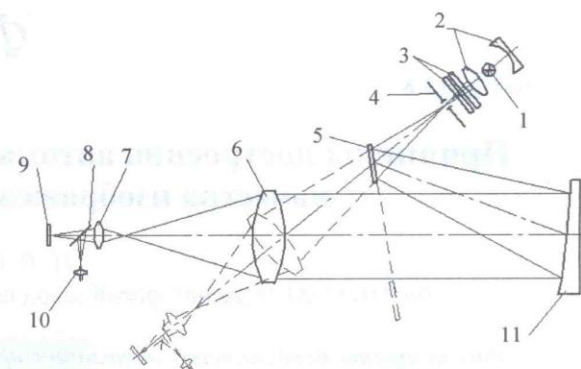
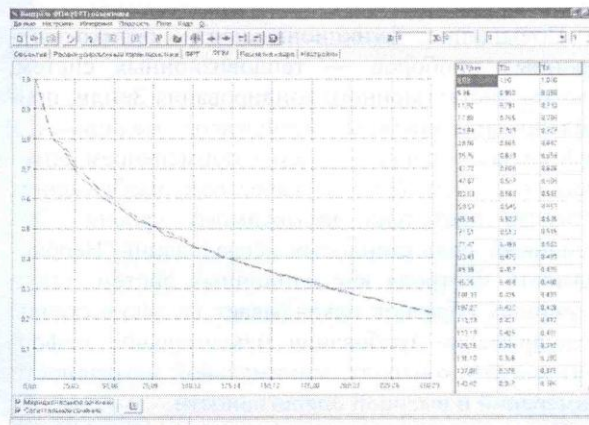
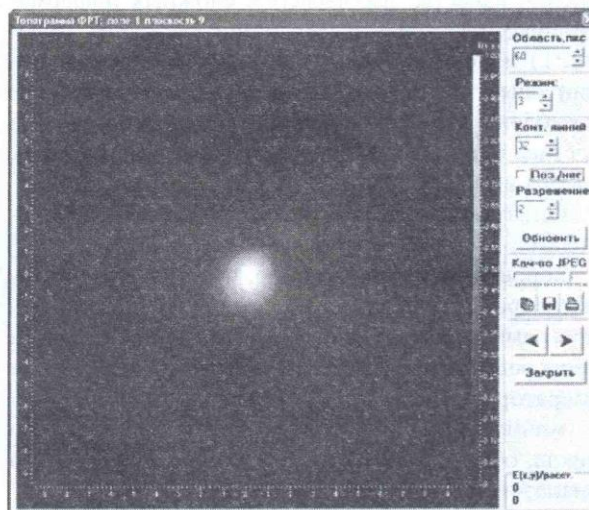


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема установки для контроля качества изображения ОС:

- 1 — источник излучения; 2 — конденсор; 3 — светофильтры; 4 — точечная диафрагма; 5 — зеркало; 6 — контролируемая ОС; 7 — проекционный микрообъектив (объектив переноса); 8 — откидное зеркало; 9 — ПЗС-матрица; 10 — окуляр; 11 — параболическое зеркало коллиматора



а



б

Рис. 2. Управляющая программа установки в режиме: а — отображения ФПМ; б — полутоновой топограммы ФРТ

Формула (1) верна в случае, если тест-объект и анализатор имели бы бесконечно малый размер,

реально же их размер конечен. Поэтому возникает вопрос о допустимом размере тест-объекта. Тогда при контроле ФПМ он может быть легко учтен как $\tilde{S}_{m\ out} = |\tilde{S}_m| / \tilde{a}(v'_m)$, где $\tilde{a}(v'_m)$ — пространственно-частотный спектр (ПЧС) тест-объекта, приведенный к плоскости изображения контролируемой ОС.

Для корректного пересчета необходимо, чтобы первый нуль в приведенном спектре тест-объекта был выше предельной пространственной частоты, передаваемой испытываемой ОС.

• Если тест-объект — щелевая диафрагма, то приведенный спектр рассчитывается как

$$\tilde{a}(v'_m) = \sin c(\pi d v'_m f'_{os} / f'_k), \quad (3)$$

где d — ширина щелевой диафрагмы; f'_{os}, f'_k — фокусные расстояния ОС и коллиматора.

Допустимая ширина щели определяется из условия $d v'_m f'_{os} / f'_k < 1$, практически его лучше ужесточить, принимая $d v'_m f'_{os} / f'_k < 0,9$.

Предельная пространственная частота определяется из дифракционных соотношений, и для предмета в бесконечности равна $v_{\max} = D / (\lambda f'_{os})$, тогда выбор ширины щели осуществляется из условия $d < 0,9 \lambda f'_k / D$, где D — диаметр входного зрачка контролируемого объектива, λ — длина волны.

• Если тест-объект — круглая диафрагма, то ее ПЧС описывается как

$$\tilde{a}(v'_m) = b \text{esin} c(\pi d_0 v'_m f'_{os} / f'_k).$$

В то же время, если для учета ее влияния брать первый нуль в спектре, то он может быть аппроксимирован выражением (3) при замене диаметра диафрагмы эквивалентной шириной. Из формулы (3) первый нуль ПЧС щели равен $v_{1-0} = f'_k / (d f'_{os})$, первый нуль приведенного ПЧС круглой диафрагмы $v_{1-0} = 3,83 f'_k / (\pi d_0 f'_{os})$, откуда получается эквивалентная ширина $d_e = \pi d_0 / 3,83$.

Конечный размер площадки анализатора может быть учтен аналогичным образом с учетом увеличения проекционного микрообъектива (объектива переноса) вместо отношения фокусов. Именно микрообъектив обеспечивает нужный шаг дискретизации ФРТ. Зная его увеличение и размер пикселя, можно оценить частотный диапазон измерительного средства

$$v' \leq |\beta| / (2t),$$

где t — размер пикселя или шаг анализатора;

β — увеличение микрообъектива.

Например, для описываемой установки (см. рис. 1) $\beta = -20^\times$; $t = 6,45$ мкм. Согласно (3) $v' \leq 1550,4$ мм⁻¹.

Микрообъектив должен иметь минимальное (доли процента) рассеяние, дифракционное качество изображения, апохроматическую коррекцию и по апертуре перекрывать наиболее светосильную из контролируемых на установке ОС. Его увеличение должно быть аттестовано в составе узла анализатора с погрешностью не хуже $0,01^\times$.

Влияние аберраций оптических компонентов установки на погрешность измерений передаточных функций может быть оценено путем анализа их зрачковых функций [2]. В работе [3] показано, что в отношении аберраций требования к оптическим компонентам сильно зависят от того, на каких относительных пространственных частотах выполняются измерения.

Наиболее жесткими требованиями становятся при измерениях в области $0,25-0,3$ от максимальной передаваемой пространственной частоты (v_{\max}). В этом случае при измерениях ФПМ с погрешностью $0,03$ волновые аберрации не должны превышать $0,025\lambda$. В то же время при работе на пространственных частотах порядка $0,05v_{\max}$ требования становятся свободнее критерия Рэлея. При смещении в область высоких пространственных частот влияние аберраций оптических компонентов снова снижается.

При недостаточном уровне фотосигнала (малый зрачок контролируемой ОС, большое поглощение светофильтров для задания спектрального диапазона и т. п.) сильное влияние на форму ФРТ (ФРЛ) оказывают шумы приемника и электронного тракта. Пример такой ФРТ приведен на рис. 3, а. Дальнейшая обработка подобной информации может привести к ошибкам при оценке размеров пятна рассеяния или расчете ФПМ. В этом случае целесообразна программная обработка сигнала в целях фильтрации шумов. В качестве простого, но очень эффективного решения может выступать сглаживание на интервале при снижении уровня сигнала до некоего порогового значения U_{cr} . В этом случае сигнал в произвольной i -й точке массива равен

$$U_i = \begin{cases} U_i, & U_i \geq U_{cr} \\ \left(\sum_{k=i-[s/2]}^{[s/2]} U_k \right) / s, & U_i < U_{cr} \end{cases}$$

Возникает вопрос о допустимом числе точек интервала сглаживания s . Очевидно, что участок ПЧС, информация о котором может быть потеряна при сглаживании, должен находиться за пределами исследуемого частотного диапазона. Если t — шаг пикселей; β — увеличение микрообъектива, то интервал сглаживания выбирается из условия $s \leq |\beta| / (t v)$. На рис. 3, б приведена ФРТ, полученная с применением функции сглаживания.

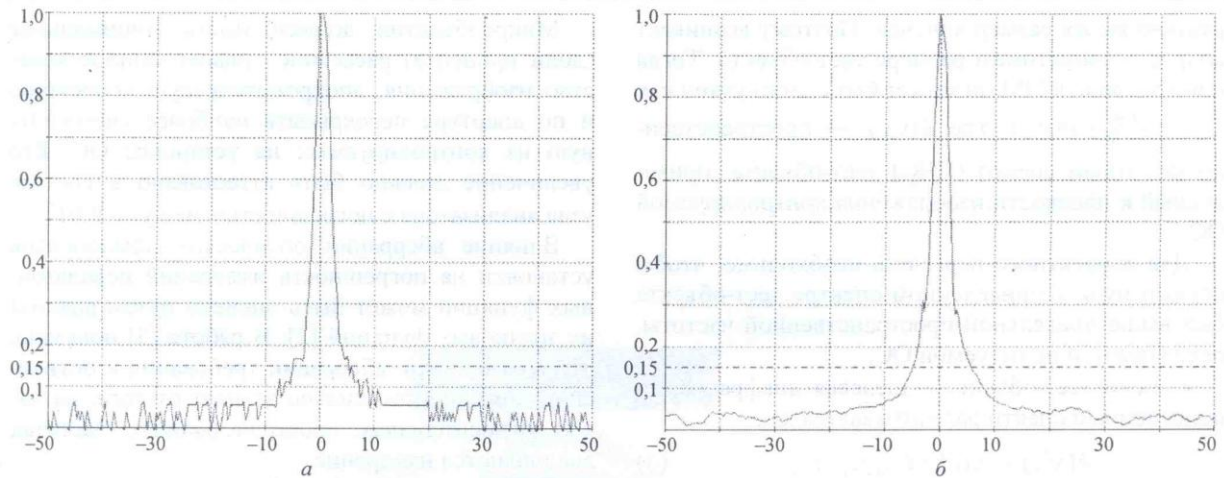


Рис. 3. Функция рассеяния точки, полученная при слабом сигнале:
а — без фильтрации; б — с фильтрацией

Роль внешних возмущений

Важным моментом при создании автоматизированных средств контроля является отстройка от вибрационных воздействий и внешних возмущений, не всегда устранимых полностью в производственных условиях даже при монтаже элементов установки на общем основании со средствами виброгашения. Они носят случайный характер, но неизбежно ведут к уширению ФРТ (ФРЛ). Поэтому в ходе измерений можно порекомендовать съемку в каждой плоскости анализа не одного, а серии кадров, и выбор для обработки кадра, дающего ФРТ с наименьшей шириной. Так, в разрабатываемой (см. рис. 1) установке для каждой плоскости анализа может обрабатываться до 20 кадров с возможностью управления временным интервалом между ними.

Серьезной проблемой при создании автоматизированных средств является учет влияния передаточной функции приемно-регистрирующего электронного тракта (ЭТ). Обычно это сопрягаемые с компьютером устройства на основе спектральных фото головок или чувствительных промышленных видеокамер. Как правило, фирмы-производители не предоставляют информацию о передаточной функции всего устройства или данные для ее получения. Кроме того, надежные универсальные методики оценки этой функции расчетным путем отсутствуют.

Получить передаточную функцию ЭТ опытным путем можно путем анализа изображения пограничного теста, построенного эталонным объективом непосредственно на матрице, без объектива переноса. Это может быть как проекционный объектив, так и объектив, работающий из бесконечности. В последнем случае его фокусное расстояние должно быть на порядок меньше фокусного рас-

стояния коллиматора. Реальное пятно рассеяния объектива должно соответствовать размеру пикселя матричного анализатора, а его оптическая передаточная функция аттестована интерференционным методом*. Поскольку между пограничной кривой $E'_{fr}(x)$ и функцией рассеяния линии $A'(x)$ существует однозначная связь [4]

$$A'(x) = dE'_{fr}(x)/dx,$$

то передаточную функцию электронного тракта можно представить как

$$\tilde{S}_{et}(v_x) = |\tilde{F}(A'(x))| / \tilde{S}_{EO}(v_x),$$

где \tilde{F} — оператор преобразования Фурье, $\tilde{S}_{EO}(v_x)$ — ФПМ эталонного объектива.

К плоскости анализа контролируемой оптической системы она приводится через увеличение объектива переноса.

Полученная с помощью (4) характеристика вводится в управляющую программу и учитывается вместе с тест-объектом при расчете ФПМ контролируемого объектива.

Экспериментальные данные

При обработке полученных данных, расчете ФПМ управляющая программа (см. рис. 2) позволяет учесть размеры тест-объекта, анализатора, передаточную функцию ЭТ, выполнить сглаживание зашумленного сигнала. Реализована коррекция нелинейности усилительного тракта путем квадратичной интерполяции узлов поправочной характеристики

$$dU(U),$$

* При аттестации электронного тракта рабочая длина волны интерферометра имитируется с помощью интерференционного светофильтра.

где U — величина фотосигнала на выходе усиленного тракта;

dU — его отступление от линейной характеристики.

Погрешность измерения ФПМ рассмотренным методом составляет около 0,03 ед. контраста и является результатом тестовой эксплуатации установки (см. рис. 1), а также установки, описанной в работе [1]*. Это удовлетворяет потребностям как производственного, так и лабораторного контроля качества изображения оптических систем.

Заключение

Поскольку автоматизированные средства контроля функций качества предусматривают наличие механизмов точного позиционирования с программным отслеживанием текущих координат анализатора, то становится возможным попутное

* На таком же уровне находится погрешность средств контроля ФПМ (ФРТ) и других разработчиков, например Opticos Corp., США (<http://www.opticos.com>) или Trioptics, Германия (<http://www.trioptics.com>).

измерение дополнительных параметров [4], а именно:

фокусного расстояния: гониометрическим методом или методом увеличения;

фокальных и рабочих отрезков: фиксируя положение плоскости наилучшего изображения относительно посадочной плоскости объективодержателя;

хроматизма положения: фиксируя положение плоскости наилучшего изображения при смене интерференционных светофильтров, выделяющих спектральные участки.

Литература

1. Заварзин В. И., Осипович И. Р. Измерение функции передачи модуляции крупногабаритных объективов//Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. — М.: Машиностроение, 2003. № 2. С. 76—84.
2. Родионов С. А. Автоматизация проектирования оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1982. — 270 с.
3. Герловин Б. Я. Выбор допусков на aberrации установок для измерения функции передачи модуляции//Оптическая промышленность, 1984. № 9. С. 22—24.
4. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1987. — 264 с.

Статья поступила в редакцию 19 июля 2008 г.

Principles of construction of the automated means for quality assurance of an image of optical systems

I. R. Osipovich

Krasnogorsk Factory, Krasnogorsk, Russia

Features of the automated quality assurance of an image of optical systems by a method of the frequency analysis of the image for the simple test-object are considered. The basic advantages of the given method and problems of its realization are revealed. Recommendations on minimization of the reasons of the measurement errors are given.

PACS: 06.30.-k; 07.50.-e