

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ МОНОХРОМАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ С ВЫЧИТАНИЕМ ДИСПЕРСИИ

Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.
Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Подход к получению мультиспектральных изображений пространственной области, предложенный в работе [1], основывается на вычитании дисперсии при обратном прохождении через ту же оптическую систему. Спектральная фильтрация обеспечивается пространственным выделением части дисперсионного изображения протяженного входного окна и устранением посредством вычитания дисперсии суперпозиции пространственно-спектральной информации. Преимуществами подхода являются взаимная независимость пространственного и спектрального разрешения, повышенный спектральный контраст [2], при разработке схемных решений могут быть использованы простые оптические элементы (сферические и плоские зеркала, плоская отражательная дифракционная решетка), разработан малоабберационный вариант оптической системы.

Как показано в [2], границы спектрального интервала, в котором точка объекта изображается системой, зависят от положения этой точки в проекции на направление дисперсии, причем смещение интервала является линейной функцией координаты. Для полного охвата спектрального интервала может потребоваться серия измерений при различных положениях (углах наклона) дифракционной решетки. Таким образом, в результате будет зарегистрирован массив данных вида $A(x'', y'', \alpha)$, где x'' , y'' – координаты точки на детекторе, α – угол поворота дифракционной решетки. Для практических целей необходимо иметь возможность получить из этого массива спектральную информацию для набора точек (x_0, y_0) входного окна $I(x_0, y_0, \lambda)$. При этом спектральное разрешение не будет превышать

$$\Delta\lambda = \frac{b \cos \beta_0}{kf_{cam}} \Delta d, \quad (1)$$

где b – постоянная решетки, k – порядок дифракции, Δd – ширина отверстия в маске в направлении дисперсии, f_{cam} – фокусное расстояние камерного объектива монохроматора. Отсчет координат в плоскости объекта и изображения проводится от осевого луча, который проходит через центры объективов, падает на

дифракционную решетку под углом α_0 , а дифрагирует под углом β_0 .

В первом приближении можно считать, что при регистрации сигнала $I_0(x, y, \lambda)$ на детекторе он модулируется функцией пропускания системы $\psi(x'', y'', \lambda, x, y, \alpha)$ и функцией пропускания детектора $\xi(x, y, \lambda)$.

$$A(x'', y'', \alpha) = \psi(x'', y'', \lambda, x, y, \alpha) \cdot \xi(x, y, \lambda) I_0(x, y, \lambda) \quad (2)$$

Чтобы из этого массива данных получить оценку оригинальной пространственно-спектральной информации, необходимо использовать калибровочную функцию κ , которая отображает каждую точку куба данных $A(x'', y'', \alpha)$ в точку куба данных $I(x_0, y_0, \lambda)$

$$\kappa : (x'', y'', \alpha) \rightarrow (x_0, y_0, \lambda). \quad (3)$$

В пренебрежении искажениями изображения входного окна на детектор функция κ учитывает только описанное выше соотношение между положением спектральной полосы и координатой точки на детекторе

$$\lambda = \kappa(x'', \alpha). \quad (4)$$

При существенной величине аберраций (в том числе, дисторсии) необходимо использовать более общий вид (3), включающий вторую пространственную координату.

Для построения калибровочной функции можно воспользоваться полученными в [2] соотношениями для границ выделяемой спектральной полосы:

$$\begin{cases} \lambda \geq \frac{b}{kq} \left(x'_1 + \frac{q}{p} x'' + qC \right) \\ \lambda \leq \frac{b}{qk} \left(x'_2 + \frac{q}{p} x'' + qC \right) \end{cases}, \quad (5)$$

где $p = \frac{f_{col}}{\cos \alpha_0}$, $q = \frac{f_{cam}}{\cos \beta_0}$, $C = \sin \alpha_0 + \sin \beta_0$, f_{col} –

фокусное расстояние коллиматорного объектива монохроматора.

Отсюда следует, что калибровочная функция может быть представлена в виде

$$\lambda = \frac{b}{k} (\sin \alpha_0 (1 + \cos \psi) - \sin \psi \cos \alpha_0) + \frac{b}{kf_{cam}} x'_m + \frac{b}{kf_{col}} x'' \cos \alpha_0, \quad (6)$$

где x'_m – координата центра отверстия маски в промежуточной плоскости изображения, также для удобства вместо угла β_0 введен угол $\psi = \alpha_0 - \beta_0$. Этот угол является параметром системы (угол между оптической осью системы перед падением на дифракционную решетку и после дифракции), поэтому более предпочтителен для использования в калибровочных расчетах. Формула получена при рассмотрении в качестве длины волны λ центральной длины волны спектральной полосы. При калибровке определить положение центра спектральной полосы возможно только для полос, которые целиком помещаются на детекторе, то есть при достаточно узкой щели в промежуточной плоскости изображения. К примеру, при численном моделировании процедуры калибровки использована решетка с $b = 1200$ штр./мм, ширина маски составляет 0.33 мм, при этом ширина изображения на детекторе при монохроматическом излучении с $\lambda = 500$ нм составляет 0.9 мм. В первом приближении можно считать, что расширение отверстия в маске не приведет к искажениям калибровочной функции, так что можно использовать полученные результаты для измерений при другой ширине.

При проведении реальных измерений углы и координаты в формуле (6) могут быть измерены с ограниченной точностью. Поэтому представляет интерес возможность их приблизительного задания с последующей корректировкой посредством процедур нелинейной аппроксимации. В таком случае можно ввести следующие параметры: α_p – базовый угол падения на дифракционную решетку, x''_p – базовая координата в плоскости детектора, $B = \frac{b}{kf_{cam}} x'_m$, так что формула

(6) примет вид

$$\lambda = \frac{b}{k} (\sin(\alpha_p + \alpha)(1 + \cos \psi) - \sin \psi \cos(\alpha_p + \alpha)) + B + \frac{b}{kf_{col}} \cos(\alpha_p + \alpha)(x''_p + x). \quad (7)$$

Представляет интерес получение величин параметров α_p, ψ, x''_p, B при проведении калибровки, включение их в калибровочную функцию и дальнейшее использование при обработке результатов измерений. При таком подходе устраняется необходимость точного измерения углов α (фактически, угла поворота дифракционной решетки) и ψ в системе, что представляет собой достаточно трудоемкую задачу при массовом изготовлении спектральных приборов.

Получение величин указанных параметров может быть проведено посредством построения нелинейной регрессии с оценкой разброса результатов при помощи МНК. В общем виде для данной процедуры желательно использование весовых коэффициентов или параметризации для уравнивания вкладов отдельных параметров в общий результат.

На первом этапе была проведена оценка вклада слагаемых в формуле (6) и влияния ошибок измерения угловых величин и линейных координат на результат оценки длины волны. Вклад первого слагаемого существенно преобладает, что будет учтено при построении регрессии. Была построена нелинейная регрессия, позволяющая восстановить только параметры x''_p, B при фиксированных параметрах α_p, ψ .

1. Гулис, И. М. Двойной монохроматор изображения с вычитанием дисперсии / И. М. Гулис, А. Г. Купреев, А. Г. Костюкевич // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2011. – № 2. – С. 19–23.
2. Гулис, И. М. Спектральная селекция в монохроматоре изображения с вычитанием дисперсии / И. М. Гулис, А. Г. Купреев // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2014. – № 3. – С. 3–7