

# 成像光谱仪辐射测量一致性校正中插值方法选择

陈旭<sup>1,2</sup>, 向阳<sup>1\*</sup>, 冯玉涛<sup>3</sup>

1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院西安光学精密机械与物理研究所, 光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

**摘要** 谱线弯曲破坏了色散型成像光谱仪光谱辐射能量采集的一致性, 采用插值的办法对系统采集到的辐射能量数据依据无偏离波长定标数据重新采样, 可以提高光谱辐射测量的一致性。选择恰当的插值采样方法尤为重要, 直接影响校正后辐射能量偏差的剩余量, 决定了校正效果的好坏。采用常用的线性、三点二次多项式、四点三次 Lagrange、五点四次 Lagrange、三次 Hermite 和三次样条插值方法对存在光谱偏离的像元采集到的辐射能量数据进行重新采样, 比较采样后辐射能量剩余偏差, 结果表明: 四点三次 Lagrange 插值和三次样条插值的校正效果明显好于其他四种方法。对于系统光谱偏离量 10% ( $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ ), 辐射能量归一化偏差  $PV = 0.06$ , 插值校正后  $PV < 0.022$ , 采用其他四种方法校正后  $PV$  均大于 0.035。另外, 光谱分辨率较低时( $\Delta\lambda > 5 \text{ nm}$ ), 四点三次 Lagrange 插值略优; 光谱分辨率较高时( $\Delta\lambda < 5 \text{ nm}$ ), 三次样条插值略优。

**关键词** 插值; 辐射能量校正; 光谱偏离; 成像光谱仪

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)04-1147-04

## 引言

色散型成像光谱仪利用狭缝将望远镜和光谱仪有机地结合在一起, 能够提供景物连续的光谱图像<sup>[1]</sup>。谱线弯曲的存在破坏了狭缝单色像与探测器穿轨行像元的对准, 进而导致穿轨方向同一行不同位置的像元光谱辐射能量采集的不一致, 破坏了成像光谱仪对景物图像和光谱辐射的一致性<sup>[2,4]</sup>。Green 指出光谱偏离控制在 1% 以内才不会给辐射测量带来明显的偏差<sup>[5]</sup>。成像光谱仪面阵探测器的像元是直线网格分布的, 大多数图像分析系统处理数据都认为对应一个光谱通道的所有空间像元具有相同的中心波长, 所以, 将系统采集到的光谱辐射数据重新采样, 产生原始标定的无偏离中心波长对应的光谱辐射数据的输出阵列, 可以校正辐射能量的偏差, 提高成像光谱仪光谱辐射测量的一致性<sup>[3,6,7]</sup>。根据航天遥感领域应用的成像光谱仪采集数据的特点选择恰当的插值采样方法决定着辐射校正效果的好坏。本文将在可见近红外 (400~1000 nm) 光谱范围内, 模拟计算不同光谱分辨率下, 分别采用分段线性插值、分段三点二次多项式插值、分段四点三次 Lagrange 插值、分段五点四次 Lagrange 插值、分段

三次 Hermite 和分段三次样条插值<sup>[3]</sup>对存在光谱偏离的像元采集到的光谱辐射数据进行二次采样, 产生原始标定的无偏离中心波长对应的光谱辐射能量的近似值。比较六种方法插值采样后, 与无光谱偏离光谱辐射能量数据相比, 系统辐射能量的归一化偏差的剩余量, 以确定最佳的重新采样插值方法, 及其与系统光谱分辨率的关系。

## 1 辐射能量偏差

色散型成像光谱仪存在谱线弯曲时, 探测器上第  $j$  行第  $(i+m, j)$  个像元相对第  $(i, j)$  个像元存在  $m_j$  的谱线弯曲量 (如图 1 所示), 则像元  $(i+m, j)$  的中心波长相对像元  $(i, j)$  存在光谱偏移量为  $m_j$ , 这使得沿穿轨方向同一行不同位置像元的中心波长和光谱响应函数都出现偏差。即使成像光谱仪观测均一地目标, 由于谱线弯曲的影响, 系统得到的地面第  $i$  和  $i+m$  个景物像元的光谱辐射曲线也会不同, 这降低了系统辐射测量的一致性。如图 2 所示为系统光谱分辨率为  $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$  时不同光谱偏离量下辐射能量归一化偏差曲线, 随着光谱偏离量的增大辐射能量的偏差也不断变大, 系统辐射测量的一致性降低得越严重, 必须加以校正。

收稿日期: 2010-06-22, 修订日期: 2010-09-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60538020) 和国家 (863 计划) 项目 (2006AA12Z143) 资助

作者简介: 陈旭, 女, 1984 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士生 e-mail: chxu2009@126.com

\* 通讯联系人 e-mail: xiangy@sklao.ac.cn

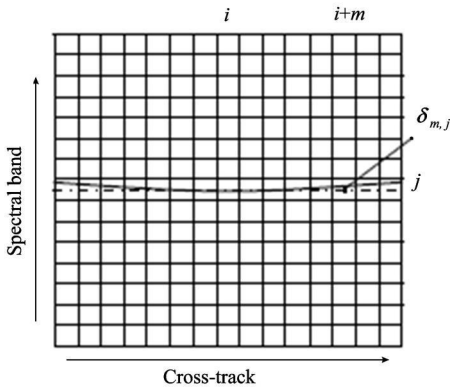


Fig 1 Spectral curvature on detector array

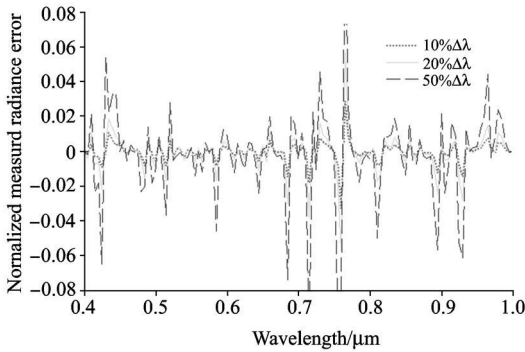


Fig 2 Normalized error of measured radiance

## 2 辐射能量偏差校正的插值方法

对存在谱线弯曲时第  $i + m$  列像元采集到的辐射能量进行二次采样, 得到第  $i$  列像元中心波长所对应的辐射能量的拟合值, 以减小谱线弯曲给穿轨像元光谱辐射能量曲线带来的偏差, 提高成像光谱仪光谱辐射测量的一致性。根据插值理论, 第  $j$  个光谱通道第  $i + m$  个像元在第  $i$  个像元中心波长  $\lambda_j$  的光谱辐射能量近似值  $i_{i+m,j}$  可以从第  $i + m$  列像元采集到的光谱辐射能量数据中重新构建, 即由光谱曲线上波长  $\lambda_j$  附近的若干离散数据点插值得到。已知第  $i + m$  列像元采集到的光谱数据  $i_{i+m,1}(i_{i+m,1}), i_{i+m,2}(i_{i+m,2}), \dots, i_{i+m,j-1}(i_{i+m,j-1}), i_{i+m,j}(i_{i+m,j}), i_{i+m,j+1}(i_{i+m,j+1}), \dots, i_{i+m,n-1}(i_{i+m,n-1}), i_{i+m,n}(i_{i+m,n})$ , 其中下标  $n$  为光谱通道数, 只需将这些离散的光谱数据与一个被称为插值核的有限长连续冲击响应  $S(Z)$  相卷积, 即得到第  $(i + m, j)$  个像元对应第  $(i, j)$  个像元的中心波长  $\lambda_j$  的光谱辐射能量值  $i_{i,m,j}(\lambda_j)$ , 表示为

$$i_{i,m,j}(\lambda_j) = \sum_k i_{i+m,j+i+k} S(Z) \quad (1)$$

其中,  $S(Z)$  为插值核,  $Z = k - \lambda_j / \Delta\lambda$ ,  $k$  为整数, 根据插值方法不同有不同取值,  $S(Z) = \frac{1 - |Z|}{2}$ 。目前, 常用的插值方法按照插值核采样点数主要有以下几种。

(1) 两点线性插值(LI), 可以由 matlab 内置函数实现。

$$S(Z) = \begin{cases} 1 - |Z| & 0 \leq |Z| < 1, k = 0, 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 三点二次多项式插值(TQPI), 文献中报道这种方法未必会比线性插值的效果好<sup>[8]</sup>。

$$S_l(i, j) = \sum_{k=-1, k \neq l}^l \frac{i_{i,j} - i_{i+m,i+k}}{i_{i+m,j+l} - i_{i+m,j+k}} (l, k \text{ 整数}) \quad (3)$$

(3) 四点三次多项式插值(FCLI), 可以采用 Lagrange 和 Newton 多项式实现, 他们和使用普通多项式进行插值的效果是一样的, 精度也相同, 只是实现手段的不同而已, 所以这里只给出 Lagrange 多项式的形式

$$S_l(i, j) = \sum_{k=-2, k \neq l}^l \frac{i_{i,j} - i_{i+m,i+k}}{i_{i+m,j+l} - i_{i+m,j+k}} (l, k \text{ 整数}) \quad (4)$$

(4) 五点四次多项式插值(FFPI), 可以采用 Lagrange 或 Newton 多项式实现, 形式类似式(4)。

(5) 分段三阶 Hermite 插值(CHI)。这种方法要求出被插值函数  $y = f(x)$  及其导数  $f'(x)$  的值, 所以它对解析函数插值比对离散数据插值更合适, 对于  $f(x)$  未知的离散数据推荐使用样条插值。分段三阶 Hermite 插值可以由 matlab 内置函数实现。

(6) 分段三阶样条插值(CSI), 这种方法要求  $y = f(x)$ ,  $f'(x)$  和  $f''(x)$  的值。可以由 matlab 内置函数实现。

为能够更加精确地得到第  $i + m$  列像元对应于第  $i$  列像元原始定标中心波长的辐射能量值, 提高辐射校正精度, 应根据成像光谱仪采集到的辐射能量数据的特点选择合适的插值方法。应用于航天遥感领域的成像光谱仪, 在可见近红外光谱范围内光谱分辨率一般为几纳米到十几纳米, 即系统一般有几十到上百个光谱通道, 采集到的景物光谱由几十到几百个离散数据构成。另外由于大气吸收和景物特征吸收的影响, 采集到的光谱曲线多存在奇点。针对离散多奇点的数据特点选择恰当的插值方法至关重要。

## 3 计算分析

在可见近红外(400~ 1 000 nm)光谱范围内, 成像光谱仪观测均一地面景物, 由谱线弯曲导致第  $i + m$  列像元相对第  $i$  列像元存在 10% 的光谱偏离量, 计算得到不同光谱分辨率下第  $i + m$  列和第  $i$  列像元采集到的离散光谱辐射能量数据  $i_{i+m,j}$  和  $i_{i,j}$ 。为方便比较, 将两组数据用第  $i$  列像元最大单通道能量  $\max(i_{i,j})$  进行归一化。分别用上述分段线性插值、分段三点二次多项式插值、分段四点三次 Lagrange 插值、分段五点四次 Lagrange 插值、分段三次 Hermite 和分段三次样条插值方法对第  $i + m$  列像元采集到的辐射能量数据  $i_{i+m,j}$  在第  $i$  列像元的中心波长处进行二次插值采样, 将插值得到的辐射能量数据  $i_{i+m,j}(\lambda_j)$  与第  $i$  列像元采集到的辐射能量数据  $i_{i,j}(\lambda_j)$  作差, 则插值采样校正后剩余的辐射能量归一化偏差可表示为

$$i_{i,m,j} = \frac{i_{i+m,j} - i_{i,j}}{\max(i_{i,j})} \quad (5)$$

统计比较各种方法插值采样后剩余的辐射能量归一化偏差如图 3 所示, 光谱分辨率分别为 10, 5 和 2.5 nm 时, 使用上述六种插值方法得到的辐射能量归一化误差的 PV 值和 RMS 值。图中对应横坐标为 1 的数据表示插值采样校正前, 第

$i + m$  列像元相对第  $i$  列像元辐射能量偏差的 PV 值和 RMS 值。可见, 无论 PV 值还是 RMS 值, 五点四次 Lagrange 插值采样后明显增大了辐射能量的偏差, 这是由于高阶多项式的摆动带来的极大的误差, 这种方法不适合用于本文叙述的辐射能量校正的问题, 插值多项式的阶数应小于四次。对比辐射能量偏差的 PV 值, 线性插值略好于三点二次多项式插值, 二者的 RMS 在不同光谱分辨率下都很相近, 线性插值和三点二次插值对辐射能量偏差的校正效果相近, 这和文献 [8] 的论述一致。分段三次 Hermite 插值采样后辐射能量偏差的 PV 和 RMS 与线性插值也相差不大。线性插值、三点二次 Lagrange 插值和三次 Hermite 插值可以在一定程度上减小辐射能量的偏差, 且三种方法的校正精度相当。与上述三种方法相比, 分段四点三次 Lagrange 插值和分段三次样条插值对辐射能量偏差的校正效果更好, 校正后辐射能量归一化偏差的 PV 和 RMS 平均分别减小 55% 和 60%。另外, 当光谱分辨率低时 ( $> 5 \text{ nm}$ ), 四点三次 Lagrange 插值采样后辐射能量偏差更小; 当光谱分辨率高时 ( $< 5 \text{ nm}$ ), 三次样条插值采样后辐射能量偏差更小。这是因为三次样条插值要求在分段节点插值函数的一阶和二阶导数都连续。光谱分辨率低时, 离散数据间隔较大, 光谱曲线粗糙, 上述的导数连续性要求会产生较大的偏差; 而四点三次 Lagrange 插值只是在被插值离散数据附近按多项式给出近似值, 不受分段节点连续性的影响。随着光谱分辨率的增加, 被插值离散数据密度增大, 三次样条插值精度不断提高, 对光谱曲线轮廓反应更加准确, 插值采样后辐射能量的偏差逐渐减小。所以, 在实际应用中要根据具体情况合理优选二者。另外, 值得指出 Lagrange 插值有明确的解析表达式, 便于理论推导分析。而三次样条插值可以直接由 matlab 内置函数完

成, 对数据计算处理容易实现。

图 4 所示为光谱分辨率为  $5 \text{ nm}$  时, 第  $i + m$  列像元相对第  $i$  列像元存在 10% 的光谱偏离量, 采用不同插值方法对第  $i + m$  列像元进行二次采样前后辐射能量归一化偏差曲线。由图 4(a) 可见插值采样校正前辐射能量偏差的幅值在很多波长位置都大于 0.02。结合图 4(b) 可见, 采用线性插值、三点二次插值和三次 Hermite 插值二次采样后, 辐射能量偏差仅在 0.01 附近接近 0.02, 在其他大部分光谱范围内偏差降低到 0.01 以内, 且三种方法校正效果相差不大。而四点三次 Lagrange 插值和三次样条插值的校正效果在整个光谱范围内明显好于其他方法。尤其三次样条插值, 二次采样后辐射能量偏差在整个光谱范围控制在 0.01 以内。

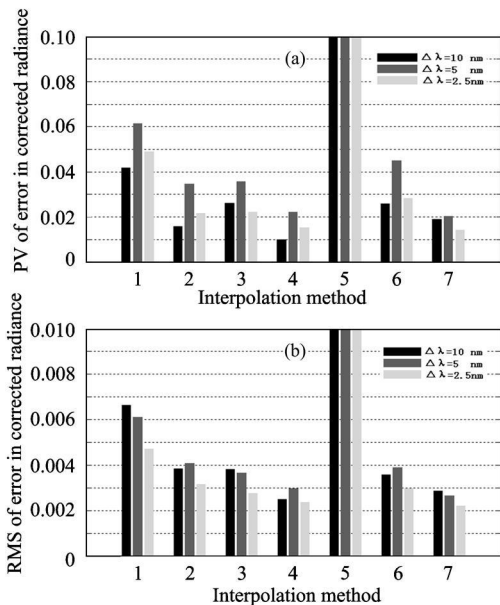


Fig 3 Statistic results of normalized errors in corrected radiance (a) PV, (b) RMS The abscissas in figure: 1: Normalized errors in un-corrected radiance; 2: LI; 3: TQPI; 4: FCLI; 5: FFPI; 6: CHI; 7: CSI

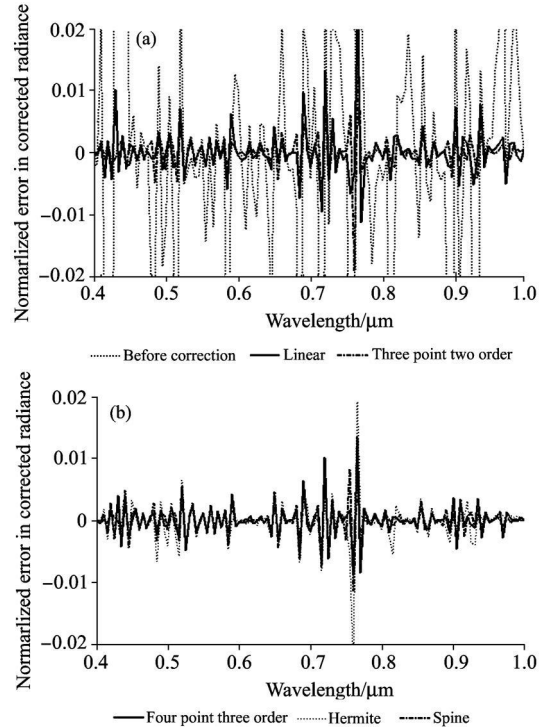


Fig 4 Normalized errors in corrected spectral radiance

### 4 结 论

采用插值的办法对存在光谱偏离时系统采集到的辐射能量进行重新采样, 可以有效地校正谱线弯曲造成的光谱辐射测量一致性的降低。随光谱分辨率的提高, 插值采样的精度也提高, 辐射能量偏差校正效果越好。四点三次 Lagrange 插值和分段三次样条插值的校正效果明显好于其他插值方法。根据光谱分辨率的不同二者各略有优势, 当光谱分辨率低时 ( $> 5 \text{ nm}$ ), 四点三次 Lagrange 插值采样后辐射能量偏差更小; 当光谱分辨率高时 ( $< 5 \text{ nm}$ ), 三次样条插值采样后辐射能量偏差更小。另外, 值得指出 Lagrange 插值容易得到简单的解析表达式, 便于理论推导分析; 而三次样条插值可以直接由 MATLAB 内置函数完成, 计算和应用简单方便。

## References

- [1] Alexander F, Goetz H, et al., Science, 1985, 228: 1147.
- [2] Luis Guanter, Karl Segl, Bernhard Sang, et al. Optics Express, 2009, 17(14): 11594.
- [3] Feng Yutao, Xiang Yang. Optics Express, 2008, 16(20): 15366.
- [4] Brown S W, Johnson B C, Biggar S F, et al. Appl. Opt., 2005, 44: 6426.
- [5] Green R O. Applied Optics, 1998, 37(4): 683.
- [6] Davis C O, Bowles J, Leathers R A, et al. Optics Express, 2002, 10(4): 210.
- [7] Guanter L, Estell s V, Moreno J. Remote Sens. Environ., 2007, 109: 54.
- [8] Recktenwald G. Numerical Methods with Matlab Implementation and Application. Beijing: China Machine Press, 2004. 364.

## Selection of Interpolation Methods Used to Mitigate Spectral Misregistration of Imaging Spectrometers

CHEN Xu<sup>1, 2</sup>, XIANG Yang<sup>1\*</sup>, FENG Yu-tao<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Xi an Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Xi an 710119, China

**Abstract** Spectral curvature destroys the co-registration of the spectra measured by dispersion imaging spectrometer. Using interpolation to re-sample the measured spectra at the non-offset mid-wavelengths can mitigate the spectral misregistration. It is very important to select an optimum interpolation method. The performances of six common interpolation methods are evaluated by comparing the residual errors in the corrected spectral radiance. The results indicate that, four-point cubic Lagrange interpolation and cubic spline interpolation are better than other four interpolation methods (linear Interpolation, three points quadratic polynomial interpolation, five points four-order Lagrange interpolation and cubic Hermite interpolation). For spectral offset of 10% ( $\Delta\lambda = 5$  nm), the normalized errors in measured spectral radiance is  $PV = 0.06$ , that is reduced to  $PV < 0.022$  after interpolation with cubic Lagrange interpolation or cubic spline interpolation, but for other four methods they are  $PV > 0.035$ . Furthermore, for lower spectral resolution ( $\Delta\lambda > 5$  nm), cubic Lagrange interpolation is a little better than cubic spline interpolation; while for higher spectral resolution ( $\Delta\lambda < 5$  nm), cubic spline interpolation is a little better.

**Keywords** Interpolation method; Radiance correction; Spectral curvature (smile); Imaging spectrometers

(Received Jun. 22, 2010; accepted Sep. 26, 2010)

\* Corresponding author