

基于可展开式太阳漫反射板的星上相对辐射定标

王灵丽¹, 武红宇¹, 白杨^{1,2}, 孟祥强¹, 贺小军^{1,2}, 黄帅¹, 杨松¹

1. 长光卫星技术有限公司 吉林省卫星遥感应用技术重点实验室, 长春 130000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000

摘要: 相对辐射定标的目的是降低或消除由于探测元件之间响应差异引起的图像高频竖向条纹或条带噪声, 是遥感数据量化应用的前提与基础。针对可展开式太阳漫反射星上定标装置, 本文提出利用漫反射板收拢过程一次成像的星上相对辐射定标方法。通过卫星机械结构驱动漫反射板收拢调整传感器入瞳处太阳入射能量, 获取覆盖传感器全部灰度动态范围的星上定标图像, 采用直方图匹配算法解算相对辐射定标系数。为了验证本文提出的方法, 利用在轨运行的吉林一号光谱星多光谱仪进行星上相对辐射定标实验, 测试定标系数对原始图像的校正效果并定量分析相对辐射定标精度, 实验结果表明定标系数能够有效消除全色与多光谱谱段地物原始图像的竖向高频条纹与条带噪声, 定量分析的结果表明本文提出的方法在传感器灰度响应的全动态范围均能达到较好的校正效果, 谱段相对辐射定标精度优于2%, 为卫星在轨运行期间进行量化遥感应用提供可靠保障。

关键词: 可展开式太阳漫反射板, 星上相对辐射定标, 直方图匹配, 多光谱仪, 吉林一号

引用格式: 王灵丽, 武红宇, 白杨, 孟祥强, 贺小军, 黄帅, 杨松. 2021. 基于可展开式太阳漫反射板的星上相对辐射定标. 遥感学报, 25(10): 2067–2075

Wang L L, Wu H Y, Bai Y, Meng X Q, He X J, Huang S and Yang S. 2021. Onboard relative radiation calibration based on deployable solar diffuser. National Remote Sensing Bulletin, 25 (10) : 2067–2075 [DOI: 10.11834/jrs.20210064]

1 引言

光学卫星是对地观测获取遥感数据的重要手段, 其中定量遥感是当前遥感研究与应用的前沿领域, 在国民经济、社会发展和国防安全等方面起到不可替代的作用(李小文, 2005)。辐射定标是量化遥感的重要保障(张志杰等, 2015), 由于卫星传感器在运输、发射中受到机械振动和加速度冲击, 以及长期在轨运行期间光电器件的老化, 不可避免的影响传感器的辐射性能, 因此需要进行在轨辐射定标校正传感器辐射性能(黄红莲等, 2012, 郭建宁等, 2005)。

星上定标利用星上定标装置测量卫星发射后的辐射定标数据, 是非常重要的在轨定标方式。星上定标装置包括定标灯、太阳漫反射板 SD (Solar Diffuser) 和月球定标设备等(黄文薪等,

2017, 2020)。1999年发射的MODIS卫星安装的星上定标装置将太阳漫反射板与衰减屏相结合, 利用运动部件衰减屏调整太阳入射能量, 通过入射的不同辐射能量对传感器进行绝对辐射定标(汪伟等, 2018)。与MODIS卫星星上定标装置类似, 2011年发射的NPP卫星搭载VIIRS传感器同样采用了太阳漫反射板与前端衰减屏的方式进行星上定标。2018年发射的高分五号卫星(GF-5)搭载的星上定标装置安装了可展开式太阳漫反射板, 利用430 mm×430 mm聚四氟乙烯太阳漫反射板进行全视场、全光路的辐射定标, 在定标任务中通过步进电器驱动机械结构将太阳漫反射板展开(晋利兵等, 2020; Wang等, 2019)。2019年发射的吉林一号光谱星JL101C多光谱仪安装了利用轴连接的可展开式太阳漫反射板, 漫反射板的方向半球反射率在420—2400 nm高于95%, 为卫星

收稿日期: 2020-03-27; 预印本: 2020-07-11

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2019YFE012700); 吉林省科技发展计划(编号:20180201108GX)

第一作者简介: 王灵丽, 1989年生, 女, 工程师, 研究方向为卫星遥感影像处理。E-mail: wll920707@sina.cn

通信作者简介: 白杨, 1983年生, 研究员, 研究方向为卫星遥感数据处理。E-mail: baiy776@163.com

在轨运行期间进行星上辐射定标提供了有力支撑。

星上定标主要用于绝对辐射定标,建立传感器响应量化值DN (Digital Number)与地表反射率或温度的对应关系,由于太阳漫反射板具有良好的朗伯特性和均匀性,在相对辐射定标具有一定优势(许和鱼等,2020)。相对辐射定标的目的是降低或消除由于探测元件之间响应差异引起的图像高频竖向条纹或条带噪声,传统的相对辐射定标通常采用基于统计的直方图匹配法和均匀场景法,两者均能较好的降低或消除由于探测元件之间响应差异引起的图像高频竖向条纹或条带噪声,但也存在着一定的缺陷。其中,基于统计的直方图匹配法,其基本假设为每个像元灰度响应分布概率一致,因此需要大量积累在轨图像数据消除由于像元成像地物差异引起的灰度直方图分布不一致(李海超和满益云,2011),在数据积累不足时难以取得理想的效果;均匀场景法多采用沙漠、海面、云层等典型的均匀场景在轨影像,采用单点法或两点法利用线性拟合解算逐像元相对于平均响应的相对辐射定标系数,所需要的数据累计时间小于基于统计的直方图匹配法,但是方法中使用的典型的均匀场景均具有一定的地物纹理特征,无法保证高精度的均匀一致性,且线性拟合的算法在像元高端及低端响应易出现欠校正的问题。利用太阳漫反射板进行相对辐射定标,基于漫反射板自身的均匀性,无需大量数据积累,极大的缩短了卫星在轨测试周期。因此,既不依赖于在轨数据积累,也不依赖于地物均匀一致性特征的基于太阳漫反射板的相对辐射定标具有其余方法不可比拟的优势。

在全球测图国家重大工程的背景下,为了探索针对类似吉林一号光谱星搭载的可展开式太阳漫反射板进行相对辐射定标的应用潜力,本文从常规相对辐射定标方法存在的不足出发,提出了对漫反射板收拢过程进行成像的相对辐射定标方法,克服了相对辐射定标对于数据累积和数据中地物均匀一致性特征的依赖,方法利用漫反射板一次收拢过程,获取不同太阳入射辐亮度下图像数据,将逐像元灰度响应利用直方图匹配校正为平均灰度响应,解算相对辐射校正系数。最后利用吉林一号光谱星漫反射板相对辐射定标实验获取的定标系数用于校正地物原始图像,并利用非

均匀性指标定量分析相对辐射定标精度。

2 定标原理

2.1 相对辐射定标

星载推扫成像采用与飞行方向垂直分布的线阵传感器通过沿飞行方向逐行推扫的方式获取地物信息,由于传感器像元响应差异导致传感器成像出现高频竖向条纹或条带噪声,影响图像质量和定量反演的精度,因此需要相对辐射定标对逐像元进行校准实现像元归一化处理。基于传感器灰度响应与入射光谱辐亮度的线性关系,传感器响应的灰度值DN可以表示为(Wang等,2018; Pesta等,2014)

$$DN = GL_{\lambda} + B \quad (1)$$

式中, L_{λ} 为传感器接收的光谱辐亮度, B 为由于电子偏差引起的灰度值响应, G 为相对增益系数与绝对增益系数的乘积,实现传感器非均匀性校正与光谱辐亮度转换。相对辐射定标的目的是使得逐像元响应在相同辐亮度下均匀一致,将逐像元的实际灰度响应校正为平均灰度响应:

$$DN = g_j DN_j + B \quad (2)$$

式中, DN_j 为像元 j 在光谱辐亮度 L_{λ} 的实际灰度响应, g_j 为像元 j 相对于平均响应的相对辐射增益系数,相对辐射定标就是准确计算相对辐射定标系数,减少或消除像元间响应差异。

2.2 可展开式太阳漫反射板

吉林一号光谱星搭载星上定标装置可展开式太阳漫反射板,利用太阳入射光进行在轨辐射定标,星上定标装置结构如图1所示,辐射定标标准传递链为:太阳辐射→漫反射板→多光谱仪。

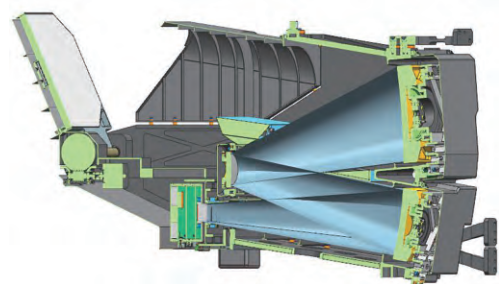


图1 吉林一号光谱星星上定标装置

Fig. 1 Onboard calibration instrument of JL-1 GP

吉林一号光谱星漫反射板利用机械转轴结构安装在多光谱仪上，通过步进电机驱动，有打开与收拢两个固定位置。在进行在轨辐射定标时，卫星通过自主调整姿态使得在收拢状态下的漫反射板与太阳光成一定入射角度，随后打开漫反射板使其展开到达定标位置，定标完成后卫星太阳漫反射板机动到收拢状态。

太阳漫反射板双向半球反射比 DHR (Directional Hemisphere Reflectance) 如图 2 所示，在整个太阳反射波段 400—2400 nm，漫反射板的方向半球反射率均在 0.95 以上，尤其在可见近红外波段，其方向半球反射比大于 0.99。满足作为星上定标漫反射板的高反射率特性。

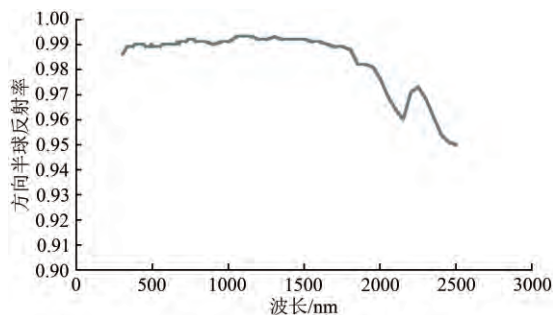


图2 漫反射板方向半球反射率
Fig. 2 DHF of solar diffuser

漫反射板在天顶角 10°—75°、方位角 0°—360° 照明垂直观测条件下，在波长 900 nm 处双向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 如表 1 所示。

表 1 900 nm 处双向反射分布函数 (BRDF)
Table 1 Data of BRDF at 900 nm

天顶角/(°)	方位角/(°)					
	60	120	180	240	300	360
10	0.345	0.345	0.345	0.345	0.346	0.345
15	0.343	0.342	0.342	0.342	0.342	0.342
20	0.339	0.339	0.339	0.338	0.339	0.339
25	0.336	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
30	0.334	0.333	0.332	0.332	0.333	0.333
35	0.329	0.329	0.328	0.328	0.329	0.330
40	0.326	0.326	0.324	0.324	0.325	0.325
45	0.321	0.320	0.320	0.320	0.320	0.321
50	0.316	0.315	0.313	0.314	0.315	0.316
55	0.310	0.309	0.308	0.308	0.309	0.310
60	0.303	0.302	0.300	0.301	0.302	0.304
65	0.295	0.293	0.292	0.293	0.294	0.295
70	0.285	0.283	0.281	0.282	0.283	0.286
75	0.272	0.269	0.266	0.267	0.270	0.272

根据表 1 漫反射板 BRDF，漫反射板整体上呈现比较均匀的漫反射效果，BRDF 变化小于 0.08，满足作为星上定标漫反射板近似朗伯体的要求。

同时，聚四氟乙烯具有较高的面均匀性，漫反射板面非均匀性优于 1%，实际在轨相对辐射定标中仅使用漫反射板局部区域，实际面均匀性会更好，满足作为星上定标漫反射板材料的均匀光谱反射比的要求。

由于漫反射板具有良好的朗伯特特性、高反射率和面均匀性，当太阳辐射入射到漫反射板后，形成均匀反射辐亮度进入多光谱仪，且漫反射板尺寸为 286 mm×214 mm，能够保证全视场多光谱仪成像。因此，可以利用漫反射板对多光谱仪进行在轨相对辐射定标。

3 定标方法

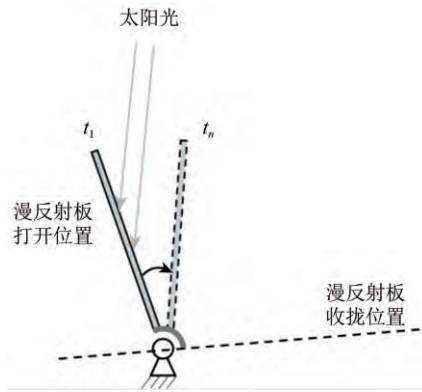
为了有效实现相对辐射定标，并尽量减少漫反射板机械结构机动的次数，本文提出对漫反射板收拢过程进行一次成像的相对辐射定标方法。方法采集可展开式漫反射板收拢图像作为星上定标图像，根据定标图像中每行图像均具有相同辐亮度的特性解算逐像元相对辐射定标系数，漫反射板定标图像采集过程如图 3 所示。

图 3 (a) 为在 t_1 — t_n 时间漫反射板由打开位置到收拢过程，其中 t_1 时刻太阳漫反射板在太阳入射能量最大的位置， t_n 时刻漫反射板位置与太阳入射光方向平行，不再反射太阳光进入传感器。图 3 (b) 为该过程获取的星上定标图像，根据线阵传感器推扫成像特性，第 i 行图像为 t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 时刻漫反射板反射的太阳辐亮度 L_i 对应的传感器灰度响应，因此每一行线阵传感器 m 个像元对应相同的辐亮度，其中像元 j ($j = 1, 2, \dots, m$) 的灰度响应为 $DN_{i,j}$ ；该过程采集的 n 行图像分别对应不同的辐亮度，辐亮度逐渐减小，因此定标图像灰度值 $DN_{1,j}$ — $DN_{n,j}$ 覆盖了传感器全部灰度响应动态范围。

根据漫反射板星上定标图像，采用直方图匹配算法解算相对辐射定标系数。直方图匹配的算法是将单个像元的灰度直方图匹配到所有像元的平均灰度直方图上，从而使得各个像元响应均匀一致。为了进行直方图匹配，统计像元 t_1 — t_n 时间漫反射板定标图像中对应成像列的灰度直方函数 PDF (Probability Distribution Function)，并根据该像元的灰度直方图利用式 (3) 计算像元的归一化

累积灰度直方函数 CDF (Cumulative Distribution Function), 作为原始累积灰度直方图:

$$F_j(l) = \sum_{k=0}^l p_j(k) \quad (3)$$



(a) 漫反射板收拢过程示意图

(a) Schematic diagram of diffuser folding process

式中, $F_j(l)$ 为像元 j 在 t_1-t_n 时间内响应灰度值小于等于 l 的归一化累积概率, $p_j(k) = n_{j,k}/n$ 为像元 j 灰度值为 k 的概率, $n_{j,k}$ 为像元 j 灰度响应为 k 的频数, n 为总频数, 即定标图像的行数。

t_1	DN _{1,1}	DN _{1,2}	...	DN _{1,j}	...	DN _{1,m}
t_2	DN _{2,1}	DN _{2,2}	...	DN _{2,j}	...	DN _{2,m}
t_3	DN _{3,1}	DN _{3,2}	...	DN _{3,j}	...	DN _{3,m}
...	...	...	...	...	...	...
t_i	DN _{i,1}	DN _{i,2}	...	DN _{i,j}	...	DN _{i,m}
...	...	...	...	...	...	...
t_n	DN _{n,1}	DN _{n,2}	...	DN _{n,j}	...	DN _{n,m}

(b) 星上定标图像

(b) Onboard calibration image

图3 星上相对辐射定标图像采集示意图

Fig. 3 Schematic diagram of onboard relative calibration image acquisition

将所有像元平均灰度响应累积直方函数作为目标累积灰度直方图:

$$T(l) = \sum_{j=0}^m F_j(l)/m \quad (4)$$

式中, $T(l)$ 为传感器所有像元响应灰度值小于等于 l 的平均归一化累积概率, m 为总像元数。

将单个像元响应与所有像元平均灰度响应相关联, 从而构建像元的直方图映射查找表。具体计算按照式 (5) 对传感器像元的输入灰度在平均灰度累积直方函数中查找对应的输出灰度, 使得逐个像元的累计灰度直方图较好地匹配到平均响应灰度直方图 (Ghani 和 Isa, 2015; Thomas 等, 2011)。

$$|F_j(k) - T(l)| = \min_x |F_j(k) - T(x)| \quad (5)$$

式中, x 为图像的灰度值响应范围, $x \in [0, \text{DN}_{\max}]$, 在目标累积灰度直方图 $T(x)$ 中查找与像元 j 灰度值 k 累积概率 $F_j(k)$ 最接近的灰度响应 l , 构建像元 j 的灰度查找表 $\text{lookup}_j(k) = l$ 。

根据直方图匹配原理, 能够对每个像元建立所有灰度响应的完整查找表, 直方图映射查找表即为相对辐射定标的结果, 其原理如图4所示。

为了定量描述相对辐射定标精度, 采用图像的非均匀性 PRNU 进行定量分析, 非均匀性是指传感器在均匀光照射时, 各像元响应的不一致性。

$$\text{PRNU} = \frac{\text{std}}{\overline{\text{DN}}} \quad (6)$$

式中, std 为图像的方差, $\overline{\text{DN}}$ 为图像的平均灰度。非均匀性系数 PRNU 越小, 相对辐射定标精度越高。

4 定标实验结果与分析

4.1 星上相对辐射定标实验

利用吉林一号光谱星进行可展开式漫反射板星上相对辐射定标实验, 漫反射板成像过程中卫星在地球阴影区, 采集多光谱仪对漫反射板收拢过程图像, 其中多光谱仪传感器参数如表2所示。

多光谱仪光谱范围覆盖可见近红外谱段 403—1050 nm 共 20 个谱段, 本文将地面像元分辨率 5 m 的 PAN 全色 (B0) 谱段, 及多光谱 Blue (B3)、Green (B4)、Red (B5)、NIR (B6) 常用的 5 个谱段作为测试谱段, 用于验证本文提出的定标方法。定标成像时刻为 2020-01-14 T 13:34:45, 成像时长 120 s, 定标中漫反射板最大展开 105°, 太阳最大入射角 65°。定标实验获取的漫反射板成像如图5所示, 由于成像过程中在漫反射板展开位置 (对应 t_1 时刻) 与不再反射太阳光位置 (对应 t_n 时刻) 前后均有时间余量, 因此定标测试成像时长大于 $t_n - t_1$ 。

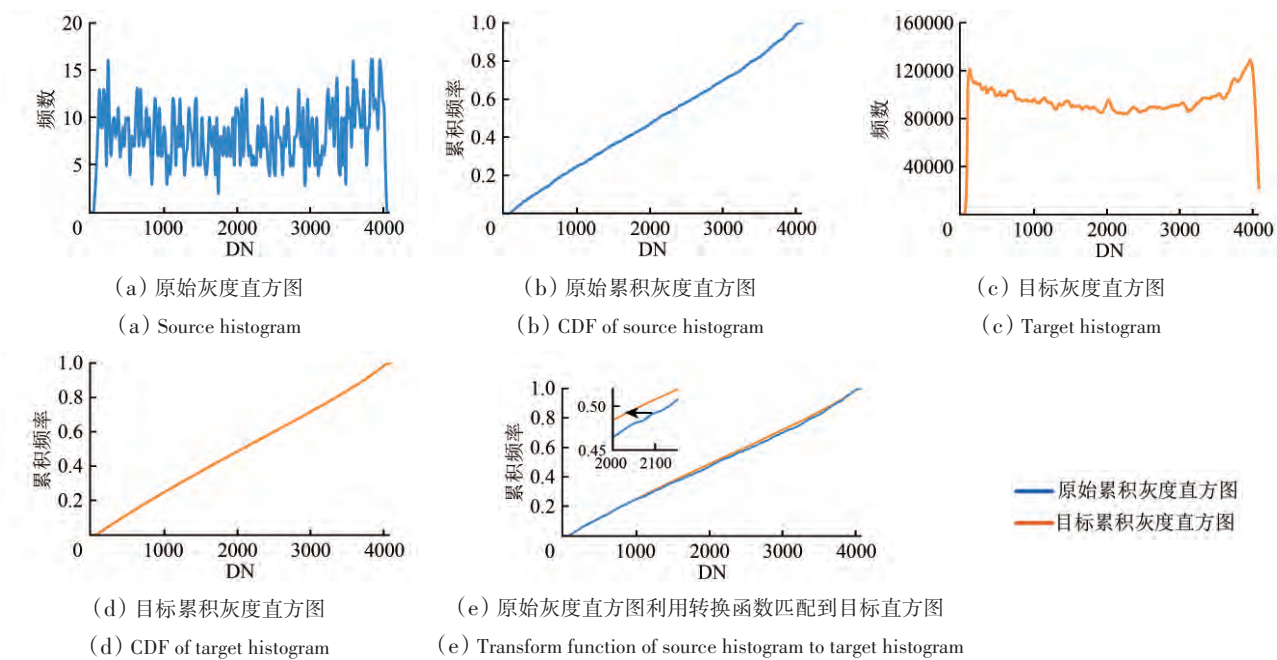


图 4 直方图匹配原理图

Fig. 4 Schematic diagram of histogram matching

表 2 多光谱仪参数

Table 2 Multispectral spectrometer parameters

传感器参数	参数值
成像方式	推扫成像
光谱范围	403—1050 nm, 共 20 谱(B0—B19)
像元分辨率/m	5 (B0—B6), 10 (B7—B12), 20 (B13—B19)
量化位数/bit	12 (B0—B6), 14 (B7—B12), 16 (B13—B19)
传感器类型/pixels	TDI CMOS 11740 (B0—B6), 5870 (B7—B12), 2935 (B13—B19)
星下点幅宽	单相机优于 58 km, 双相机优于 110 km
轨道高度/km	528
降交点地方时	12:00

多光谱仪谱段量化位数为 12 位，其灰度响应范围为[0, 4095]，漫反射板定标图像（图 5）中数据的有效灰度动态范围覆盖了谱段全部灰度响应范围， t_n — t_1 时间内图像有效数据约为 8000 行，能够较好保证相对辐射定标系数解算。

根据漫反射板定标图像，利用直方图匹配算法构建逐像元直方图匹配映射表，能够获得各个谱段各个像元的相对辐射定标结果。

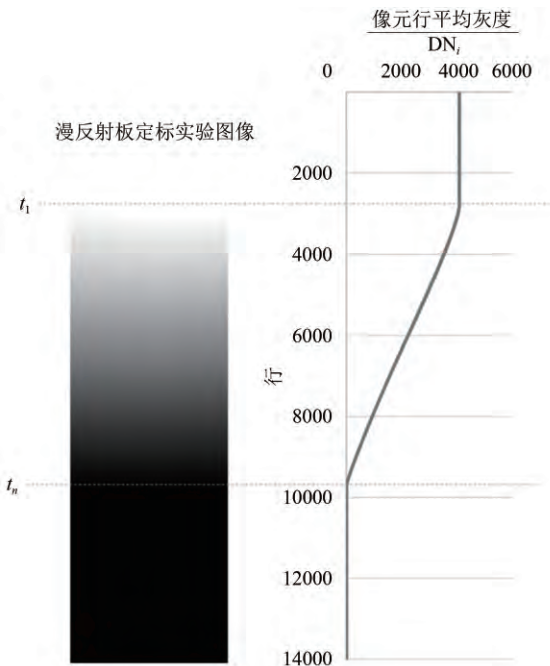


图 5 漫反射板 PAN 谱段定标测试图像

Fig. 5 Calibration image of SD for panchromatic band

4.2 定标系数校正效果与精度

为了评价和定量化分析相对辐射定标的结果，将定标系数用于校正传感器对地面拍摄的图像，测试图像相对辐射校正效果，并利用非均匀性 PRNU 定量化分析可展开式漫反射板的星上相对辐射定标精度。

(1) 校正地面原始成像。根据传感器对地图像验证星上相对辐射定标系数, 测试解算的定标系

数对多光谱谱段和PAN 谱段的校正效果, 并对比线性拟合定标系数, 测试结果如图6和图7所示。

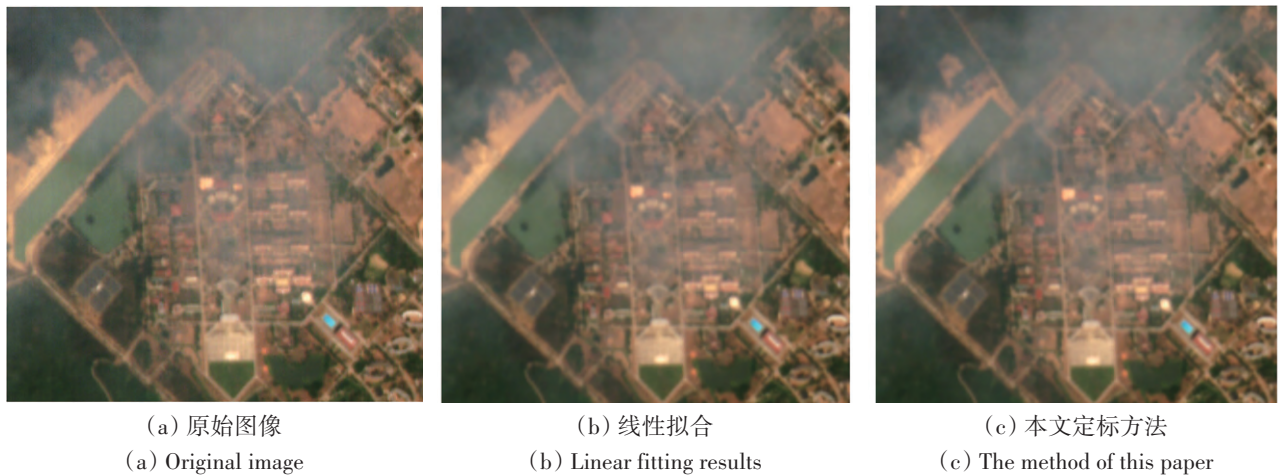


图6 澳大利亚山火多光谱谱段(RGB)相对辐射校正对比图

Fig. 6 Comparison of relative radiometric correction for multispectral bands (RGB) of Australian mountain fires

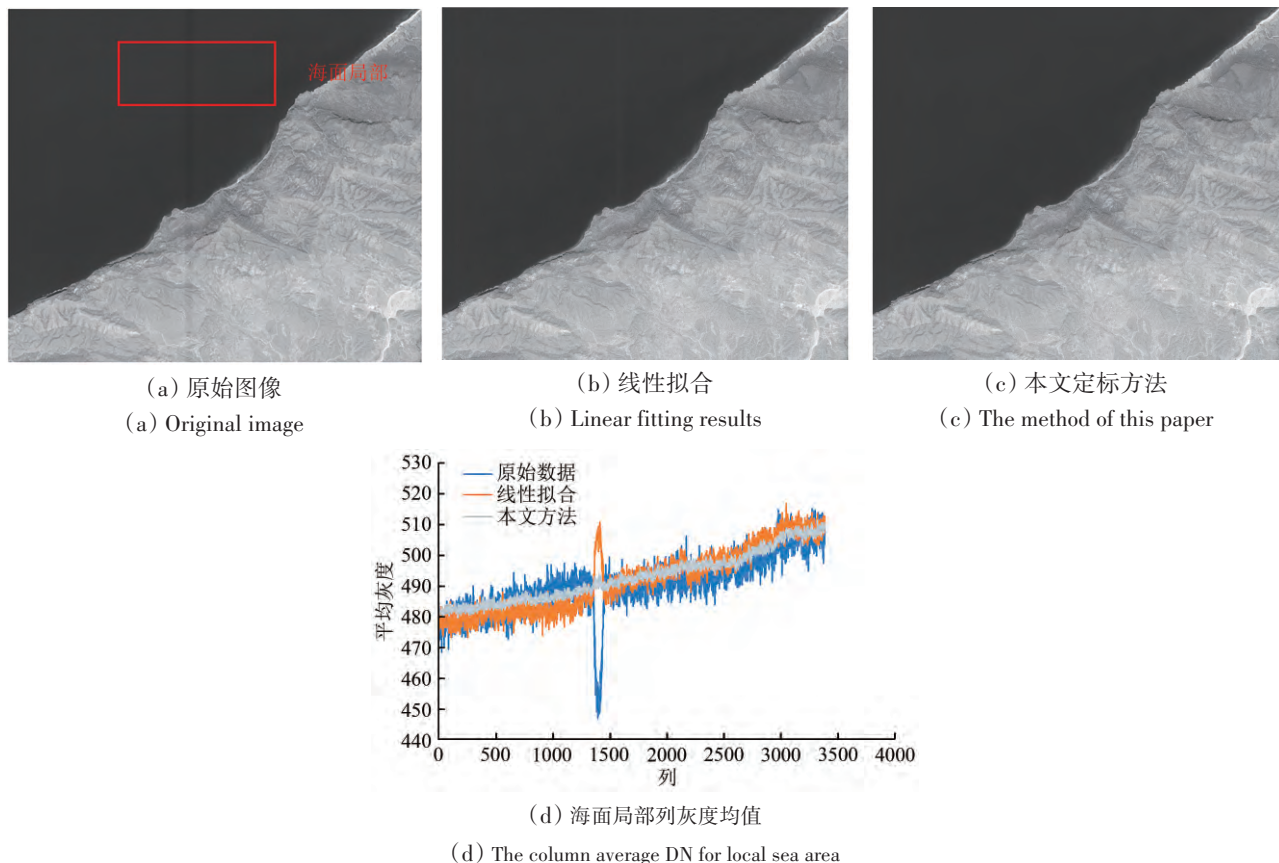


图7 索马里PAN 谱段相对辐射校正对比图

Fig. 7 Comparison of relative radiometric correction for panchromatic band of Somalia

图6为2020-02-22澳大利亚山火(14.46° N, 101.27° E)的真彩色局部图, 在烟雾的区域相对于原始真彩色图像, 本文提出的方法与线性拟合定标系数均能够实现图像Blue、Green、Red 谱段

的相对辐射校正, 有效消除像元间响应差异引起的高频竖向条纹, 改善图像质量。可见本文提出的方法与线性拟合算法均能够对多光谱谱段的高频竖向条纹起到较好地校正效果。

图7为2020-02-22索马里(11.55°N, 50.28°E) PAN谱段均匀的低亮度海面区域校正前后图像, 图7(b)、(c)分别为线性拟合算法与本文提出方法定标系数的校正效果。对比较正效果, 在低亮度海域本文提出的方法很好校正了原始图像中的异常条带, 而线性拟合的算法校正后条带灰度值偏亮, 校正失效。在图7(d)绘出了原始图像中矩形区域海面的列均值, 虽然整体上本文提出的方法与线性拟合算法均减小了列灰度波动, 即消除了高频竖向条纹, 改善图像质量, 然而线性拟合的校正图像在异常条带噪声的位置存在残余的竖向条带, 而本文提出的方法校正后图像较好地消除该条带噪声, 且海面均匀区域的列灰度均值波动更小。可见, 本文提出的方法即便在均匀地物成像中, 对于高频竖向条纹与异常竖向条带噪声也能达到较好的校正效果。

(2) 定标精度评估。利用非均匀性评价可展开式太阳漫反射板的相对辐射定标精度, 相对辐射定标精度一般利用地面的均匀场景成像进行测试, 包括沙漠、海面、云层等, 其中海面场景有海浪的纹理、云层场景有云层轮廓, 即使均一化较好的沙漠场景, 如Libya4(28.55°N, 23.39°E)定标场其非均匀性也只有约1.3%。为了准确量化描述定标的精度, 在漫反射板定标实验完成后, 利用均匀性较好的漫反射板进行第2次成像作为非均匀性测试图像。

由于逐行图像数据对应相同的辐亮度, 根据逐行像元响应计算不同辐亮度下图像非均匀性, 并量化对比线性拟合与本文提出方法对原始图像的校正效果, 其中PAN、Blue、Green、Red、NIR谱段的非均匀性测试曲线如图8所示。

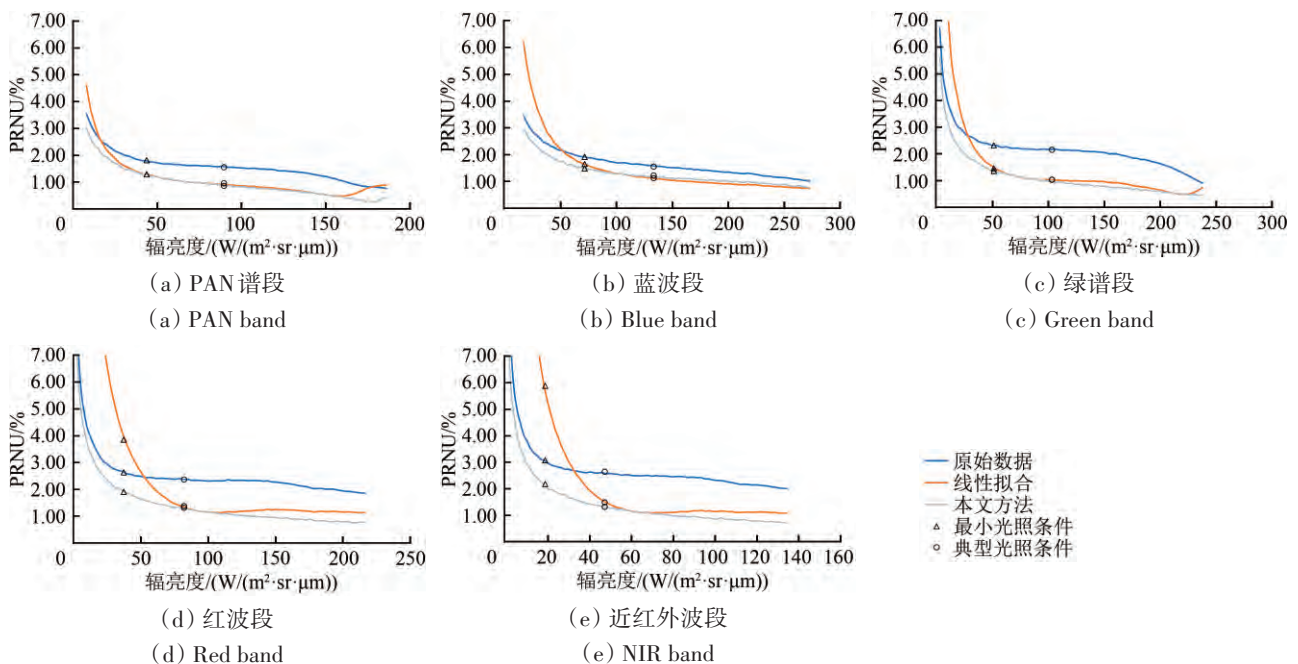


图8 各谱段非均匀性测试结果曲线

Fig. 8 The PRNU curves of each band

图8中横坐标为辐亮度值, 纵坐标为图像的非均匀性, 将中纬度冬季水体成像作为最小光照条件 L_{min} (太阳高度角 30°, 地表反照率 0.05), 将中纬度夏季城镇成像作为典型光照条件 $L_{typical}$ (太阳高度角 60°, 地表反照率 0.2) 标识对应的非均匀性位置。根据测试曲线, 可见各个谱段随着入瞳处辐亮度的增加图像的非均匀性逐渐降低, 线性拟合的算法在低亮度和高亮度区间非均匀性校

正效果差于本文的算法, 甚至在部分谱段低辐亮度区间非均匀性大于原始图像, 难以起到校正效果。

综合全色谱段与多光谱谱段的非均匀性测试结果, 本文的方法, 在传感器响应的全动态范围均能达到较好的校正效果, 尤其是对图像灰度响应的低端和高端, 校正效果明显优于线性拟合的算法。本文的方法对各个谱段均满足相对辐射定标

精度优于2%，满足高质量遥感影像应用的需求。

5 结 论

本文针对可展开式太阳漫反射板上相对辐射定标，提出采集太阳漫反射板收拢过程不同太阳入射辐射亮度的灰度响应图像，基于覆盖全部灰度动态范围的定标图像利用直方图匹配的算法解算相对辐射定标系数，快速实现高质量的相对辐射定标。通过吉林一号光谱星进行星上相对辐射定标实验，并将解算的相对辐射定标系数用于实际在轨获取的全色与多光谱图像进行相对辐射校正，校正结果表明本文提出定标方法解算的相对辐射定标系数能够消除像元响应差异引起的竖向高频条纹与条带噪声，校正效果优于线性拟合算法。通过非均匀性定量分析，本文提出定标方法对各个谱段校正效果相对辐射定标精度优于2%，在传感器灰度响应的全动态范围均能达到较好的校正效果，满足高质量遥感影像应用的需求。在轨实验充分表明本文提出的辐射定标方法能够利用一次太阳漫反射板收拢动作完成定标任务，克服了相对辐射定标对于数据累积和数据中地物均匀一致性特征的依赖，为卫星在轨运行期间进行量化遥感应用提供可靠保障。

参考文献 (References)

- Ghani ASA and Isa N A M. 2015. Homomorphic filtering with image fusion for enhancement of details and homogeneous contrast of underwater image. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 44(12): 1904-1919.
- Guo J N, Yu J, Zeng Y, Xu J Y, Pan Z Q and Hou M H. 2005. Relative radiation correction study of CBERS-01/02 satellite CCD images. *Science in China Series E Engineering and Materials Scienc*, 32(S1): 11-25 (郭建宁, 于晋, 曾湧, 徐建艳, 潘志强, 侯明辉. 2005. CBERS-01/02 卫星 CCD 图像相对辐射校正研究. *中国科学E辑: 信息科学*, 32(S1):11-25) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7259.2005.z1.002]
- Huang H L, Yi W N, Qiao Y L and Du L L. 2012. On Orbit Radiometric Calibration for Mapping Satellite-1 Sensor. *Journal of Remote Sensing*, 16(S1):22-27 (黄红莲, 易维宁, 乔延利, 杜丽丽. 2012. “天绘一号”卫星在轨辐射定标方法. *遥感学报*, 16(S1):22-27) [DOI: 10.11834/jrs.20120005]
- Huang W X, Zhang L M, Si X L, Cao X J, Li J L, Wang W and Zhu X M. 2017. The Research of On-Orbit Calibration Method Based on Solar Diffuser. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(03): 952-957 (黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 曹兴家, 李俊麟, 汪伟, 朱雪梅. 2017. 基于太阳漫反射板的星上定标方法研究. *光谱学与光谱分析*, 37(03):952-957) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)03-0952-06]
- Huang W X, Zhang L M, Si X L, Chen H Y, Hao J, Bao S W, Yang B Y and Wang J X. 2020. Influence of Non-uniformity of Light Attenuated by Solar Attenuation Screen on On-board Calibration. *Acta Optical Sinica*, 40(4): 0429002 (黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 陈洪耀, 郝军, 包诗薇, 杨宝云, 王戟翔. 2020. 太阳衰减屏光衰减非均匀性对星上定标的影响研究. *光学学报*, 40(4): 0429002) [DOI: 10.3788/AOS202040.0429002]
- Jin L B, Wang H, Zhao Y H, Hu B, Shi D L and Lian M L. 2020. Design of Expandable Diffuser Board on GF-5 VIMI. *Chinese Space Science and Technology*, 40(2): 81-87 (晋利兵, 王浩, 赵艳华, 胡斌, 石栋梁, 练敏隆. 2020. “高分五号”全谱段相机可展开定标漫反射板设计. *中国空间科学技术*, 40(2): 81-87) [DOI: 10.16708/j.cnki.1000-758X.2020.0024]
- Li H C and Man Y Y. 2015. Satellite Attitude Adjustment and Nonlinear Relative Radiometric Calibration Method Based on Linear CCD Imaging the Same Region of Non-uniform Scene. *Infrared and Laser Engineering*, 44(4): 1370-1376 (李海超, 满益云. 2015. 基于非均匀同区域线性 CCD 成像的卫星姿态调整与非线性定标方法. *红外与激光工程*, 44(4): 1370-1376) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.04.045]
- Li X W. 2005. Retrospect Prospect and Innovation in Quantitative Remote Sensing. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 35(4): 49-56 (李小文. 2005. 定量遥感的发展与创新. *河南大学学报(自然科学版)*, 35(4): 49-56) [DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2005.04.012]
- Pesta F, Bhatta S, Helder D L and Mishra N. 2014. Radiometric non-uniformity characterization and correction of Landsat 8 OLI using earth imagery-based techniques. *Remote Sensing*, 7(1): 430-446 [DOI: 10.3390/rs70100430]
- Thomas G, Florestapia D and Pistorius S. 2011. Histogram specification: a fast and flexible method to process digital images. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(5): 1565-1578 [DOI: 10.1109/TIM.2010.2089110]
- Wang H. 2019. GF-5 VIMI on-orbit calibration instrument and performance. *Journal of Computer and Communications*, 7(7): 293-300 [DOI: 10.4236/jcc.2019.77024]
- Wang M, Chen C C, Pan J, Zhu Y and Chang X L. 2018. A relative radiometric calibration method based on the histogram of side-slit data for high-resolution optical satellite imagery. *Remote Sensing*, 10(3): 381 [DOI: 10.3390/rs10030381]
- Wang W, Zhang L M, Huang W X, Yang B Y, Wang J X, Xu H Y and Bao S W. 2018. Measurement method of solar attenuation screen characteristic for on-orbit calibration. *Acta Optica Sinica*, 38(9): 0928001 (汪伟, 张黎明, 黄文薪, 杨宝云, 王戟翔, 许和鱼, 包诗薇. 2018. 星上定标衰减屏特性的测试方法. *光学学报*, 38(9): 0928001) [DOI: 10.3788/AOS201838.0928001]
- Xu H Y, Zhang L M, Li X, Huang W X, Si X L, Xu W W, Ge S L, Zhao Y H and Wang H. 2020. A relative radiometric calibration method based on solar diffuser research for a linear array CCD detector. *Acta Optica Sinica*, 40(6): 0628002 (许和鱼, 张黎明, 李鑫, 黄文薪, 司孝龙, 徐伟伟, 葛曙乐, 赵艳华, 王浩. 2020. 基于太阳漫反射板线阵 CCD 相对辐射定标方法研究. *光学学报*,

40(6): 0628002 [DOI: 10.3788/AOS202040.0628002]

Zhang Z J, Zhang H, Chang Y G and Chen Z C. 2015. Review of radiometric calibration methods of Landsat series optical remote sensors. *Journal of Remote Sensing*, 19(5): 719-732 (张志杰, 张浩,

常玉光, 陈正超. 2015. Landsat 系列卫星光学遥感器辐射定标方法综述. *遥感学报*, 19(5): 719-732 [DOI: 10.11834/jrs.20154240]

Onboard relative radiation calibration based on deployable solar diffuser

WANG Lingli¹, WU Hongyu¹, BAI Yang^{1,2}, MENG Xiangqiang¹, HE Xiaojun^{1,2}, HUANG Shuai¹, YANG Song¹

1. Changguang Satellite Technology CO., LTD. Jilin Key Laboratory of Satellite Remote Sensing Application Technology, Changchun 130000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China

Abstract: Optical satellite is an important means to obtain remote sensing data by earth observation, and radiation calibration is an important guarantee for quantitative remote sensing. As the satellite sensor is subject to mechanical vibration and acceleration shock during transportation and launch, also taking into account of the aging of optoelectronic devices during long-term on-orbit operation, the radiation performance of the sensor is inevitably affected. As such, the on-orbit radiation calibration is needed to correct the sensor radiation performance. On-orbit calibration is a very important on-orbit calibration method that uses on-satellite calibration devices to measure the radiometric calibration data after the satellite launch. The on-satellite calibrators include calibration lamps, Solar Diffusers (SD) and lunar calibrators, etc. The relative radiometric calibration is used to reduce or eliminate the image high frequency vertical fringe and stripe noise, which are caused by the response difference between detection elements. This process is the premise and foundation of the quantitative application of remote sensing image. In the background of the national major project of global cartography, in order to explore the application potential of relative radiometric calibration for the deployable solar diffuse reflector similar to the Jilin-1 GP satellite, a relative radiometric calibration method based on the solar diffuser is proposed in this paper, which is in order to solve the shortcomings of conventional relative radiometric calibration methods. The method overcomes the dependence of relative radiometric calibration on the accumulation and the uniform consistency of features in the data by imaging through the closing process of the solar diffuse reflector. The solar diffuser is driven by the satellite mechanical structure to close up and adjusts the solar incident energy at the entrance pupil of sensor, by this way acquiring the onboard calibration image. The calibration image covers the whole gray dynamic range of the sensor. Then, the relative radiation calibration coefficients are solved by histogram matching algorithm. In order to verify the method proposed in this paper, the calibration experiment is carried out with the sensor of multispectral spectrometer on JL-1 GP satellite. The correction effect of calibration coefficients on original images are tested and the accuracy of relative radiation calibration is quantitatively analyzed by using non-uniformity. The experimental results show that the calibration coefficients could effectively eliminate the vertical high-frequency fringe and strip noise of the panchromatic and multispectral original image of the ground object. The results of quantitative analysis show that the method proposed in this paper could achieve a good correction effect in the whole dynamic range of sensor's grayscale, and the relative radiometric calibration accuracy of each band is better than 2%, which fulfills the demand for high-quality remote sensing image applications. On-orbit experiments fully demonstrate that the radiometric calibration method proposed in this paper can complete the calibration task using one solar diffuse reflector closing action, and the proposed method could effectively overcome the dependence of relative radiometric calibration on data accumulation and the uniform consistency of features in the data, which provides a reliable guarantee for quantitative remote sensing applications during the satellite's on-orbit operation.

Key words: deployable solar diffuser, onboard relative radiation calibration, histogram matching, multispectral spectrometer, JL-1 satellite

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2019YFE012700)