



基于灰阶靶标的室外相对辐射定标方法

段依妮, 晏磊*, 杨彬, 景欣, 陈伟

北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871

* E-mail: liyan@pku.edu.cn

收稿日期: 2012-08-30; 接受日期: 2013-04-06

国家自然科学基金(批准号: 11174017)和国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2008AA121806)资助项目

摘要 遥感传感器的辐射定标是遥感信息定量化的基础和前提条件. 本文提出了一种基于灰阶靶标的遥感传感器室外相对辐射定标方法. 该方法采用“两个替代”的思想, 利用太阳光代替积分球光源, 利用灰阶靶标代替漫反射板, 在室外获取多个辐亮度等级的图像, 利用最小二乘法拟合得到相对辐射定标系数. 本方法的特点在于: 第一, 与实验室定标方法相比, 大大简化了定标方法的复杂性和降低实验成本; 第二, 与以往的单一辐亮度室外定标方法相比, 多个辐亮度等级的实验图像大大降低了定标的误差; 第三, 操作简便, 对环境条件要求较低, 在航空传感器的飞行前后快速定标中具有独特的优势, 实用性强. 本文从理论和实验角度证明了该方法的可行性. 使用该方法对一种宽视场多光谱相机进行了定标实验, 通过评价校正后影像上地面布设的大面积均匀靶标的像素一致性, 给出了相对辐射定标精度. 实验结果表明, 该方法有效可行, 精度满足进一步的传感器绝对辐射定标要求.

关键词

相对辐射定标
相对辐射校正
精度评价
灰阶靶标

1 引言

遥感科学与技术的基本内容包括传感器研制、遥感数据获取、数据处理、信息提取和应用5个部分^[1], 其中, 辐射定标是传感器研制的关键环节, 是遥感信息定量化的第一步^[2, 3], 包括绝对辐射定标和相对辐射定标. 相对辐射定标是绝对辐射定标前的必经步骤, 是校正由遥感器成像通道中各个探测器之间的响应及偏置的不均匀性、每个探元的固有响应和暗电流的不一致性以及探测器外围电路特征差异的响应不一致性所造成的图像采集误差^[4]. 相对辐射定标对遥感数据的处理、信息提取和应用具有重要影响^[5, 6].

按照实施阶段, 相对辐射定标主要分为实验室定标、星上内定标、辐射场定标、室外定标等, 各种定标方法在实验仪器、实验环境、精度、适用范围等

方面各有优势和不足. 其中, 实验室相对辐射定标主要采用“标准灯-漫反射标准板-待测相机”或“积分球-待测相机”^[7]方案进行定标数据采集, 与绝对辐射定标共用一套实验系统^[8]. 该方法精度最高, 技术比较成熟, 是航空和航天传感器完成总装前的必要环节, 但定标系数会随着传感器的发射、老化等因素改变, 因此还需其他定标方法作为补充. 星上内定标使用星上定标系统, 利用人工或自然光源进行相对辐射定标, 国外的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪)^[9]、ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, 先进星载热发射和反射辐射仪)^[10]、TM(Thematic Mapper, 专题制图仪)^[11]及国内的 CBERS(China-Brazil Earth Resources Satellite, 中巴地球资源卫星)系列上搭载的 WFI(Wide Field Imager,

宽视场成像仪)^[12]均带有内定标系统. 该方法能够实时监测传感器的性能, 但内定标系统结构复杂、成本高、体积大, 对于小卫星和航空传感器难以实现. 场地相对辐射定标是利用地表的均匀自然场景进行定标^[13, 14], 该方法对地表要求苛刻, 难以找到充满全视场的均匀场景, 因此在航空、航天应用中均受到限制. 室外定标是一种利用太阳作为标准辐射源的定标方法, 该方法可以克服实验室复色光源与传感器实际工作的太阳光源谱线形状、色温和辐亮度等条件不同导致的误差, 能够获得更接近实际工作状态的传感器参数, 对航空、航天传感器均适用. 目前, 国内外对室外定标的研究主要集中在绝对辐射定标方面, 发展了太阳-漫射板野外定标法^[15]和将太阳光引入实验室中定标的方法^[16, 17], 但是对相对辐射定标的研究很少, 一般作为绝对定标的辅助, 尚处于探索阶段. 究其原因, 在现有的实验条件下, 相对定标存在的问题主要有3点: 室外光照条件的不稳定、模拟均匀场景的参考物的缺乏以及实验方法设计的不足, 因此一般仅能完成一个亮度等级的相对定标, 实验数据的不确定性较大, 极大地限制了该方法的发展和应用.

针对上述问题, 本文综合现有各类定标方法的思路和特点, 提出了一种基于灰阶靶标的相对辐射定标方法. 将实验室定标的思想运用到室外定标中, 利用太阳光代替积分球光源, 利用多种反射率等级的、漫反射材料制作的灰阶靶标代替聚四氟乙烯漫反射板, 通过室外获取的多个辐亮度等级的图像建立相对辐射定标系数. 本文对该方法进行了详细介绍, 从理论和实验角度对方法的可行性进行了证明和验证.

2 室外相对辐射定标原理与方法

基于灰阶靶标的室外相对辐射定标是一种全视场、全口径的定标方法, 其基本原理是通过传感器观测太阳照射的、充满扫描视场的均匀靶标, 来评价 CCD 探元响应的不一致性, 建立精确的相对辐射定标系数. 在此基础上, 使用该系数对传感器获取的原始遥感影像进行相对辐射校正, 影像第 i 个像元的相对辐射校正公式为

$$DN_{ci} = a_i (DN_{ri} - B_i) + b_i, \quad (1)$$

其中 DN_{ci} 为相对辐射校正后的 DN 值, DN_{ri} 为原始 DN 值, B_i 为探元的暗电流值, a_i 为第 i 个探元的增益, b_i 为第 i 个探元的偏置.

(1)式中, B_i 直接从原始暗电流数据中获取, 即外部光照辐亮度为零状态下的输出图像 DN 值. 由于它是一种随机噪声, 所以通常要检测 25 次以上取均值.

对于定标系数的确定, 设 y_k 为第 k 级辐亮度等级下整张图像的平均值(减去暗电流后的平均值), x_k 为 CCD 第 i 个探元在第 k 级辐亮度等级下输出数值减去暗电流后的 DN 值, 由于目前绝大多数传感器 CCD 响应可近似为线性, 因此 a_i , b_i 满足关系:

$$y_k = a_i x_k + b_i. \quad (2)$$

按最小二乘原理对 k 个方程求解, 按照残差平方和最小的准则即可得到第 i 个探元最终的拟合系数 a_i 和 b_i .

该步骤使用最小二乘法的优势之一, 是可以同时利用多个辐亮度等级的定标图像计算定标系数, 减小单一辐亮度等级定标造成的误差, 提高室外定标的精度; 优势之二, 是可以根据探测器实际响应特性, 采用二次或多次曲线构建(2)式的拟合方程, 使结果更加接近真实情况.

根据上述定标原理, 构建室外相对辐射定标系统, 如图 1 所示.

该系统由太阳、多种反射率的灰阶靶标、待测相机及相机控制系统、地物光谱仪、相机支架 5 部分组成. 太阳提供稳定、均匀的光源; 灰阶靶标经太阳照

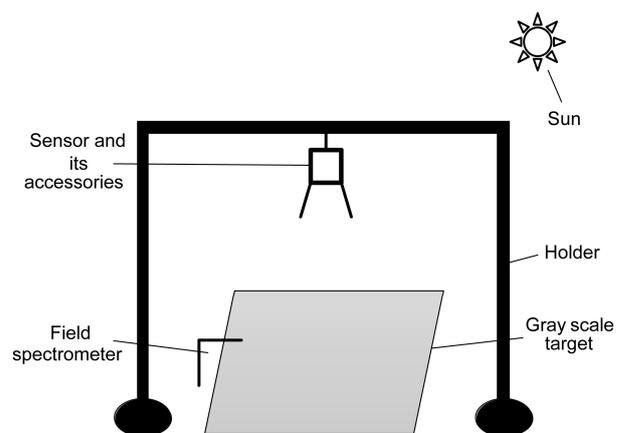


图 1 室外相对辐射定标系统组成

射, 漫反射出的均匀光充满相机视场; 待测相机及相机控制系统用来获取靶标均匀图像及暗电流图像; 地面光谱仪用来监测实验过程中灰阶靶标的辐亮度稳定性; 相机支架用来支撑相机。

传感器入瞳辐亮度的稳定性和均匀性是相对辐射定标成功与否的决定性因素, 太阳光和灰阶靶标的光学特性是实现高精度室外相对辐射定标的关键, 因此进行如下分析。

1) 太阳光的稳定性和均匀性分析

本方法的前提是在晴朗、稳定的大气状况下进行。太阳周围 90° 立体角内淡积云量小于 2%, 无卷云、浓积云。每幅图像的采集时间控制在 10 s 以内, 太阳光在此条件下可以视为稳定。太阳光的均匀性研究表明, 在晴朗条件下, 太阳光不均匀性优于 0.19%^[18], 而积分球光源的不均匀性一般为 1%~2%^[19], 因此在本方法中, 太阳光满足相对辐射定标全视场照度的不均匀性小于 5% 的要求, 可替代积分球光源, 作为标准辐射源对传感器可见光、近红外和短波红外谱段进行定标。

2) 灰阶靶标的朗伯性和均匀性分析

实验室定标和星上定标通常使用聚四氟乙烯漫反射板, 这种板组织疏松, 入射光线在材料表面的几微米深度内经多次反射, 出射光线几乎完全随机分布, 朗伯性好。然而由于其价格昂贵、大面积制作困难, 经过实验论证和比较, 本文提出使用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的一种灰阶靶标^[20]替代漫反射板的功能。该靶标为特殊工艺处理的 PU 材料制作, 反射率从低到高设计为 5%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 共 6 个等级, 具有良好的朗伯性与均匀性。图 2 为 20%, 30%, 60% 的 3 种灰阶靶标的 BRF (Bidirectional Reflectance Factor, 双向反射比因子) 抽样测试数据, MFT-20 代表反射率为 20% 的靶标, 依此类推。由该数据可以计算出 10°~75° 照明、垂直观测条件下, 靶标的 BRF 平均差异小于 0.2%[°]。对 6 种靶标的均匀性抽样测试表明, 靶标各点的灰度差异小于 1% (如图 3 所示), 与漫反射板指标相当^[21]。在灰阶靶标的 BRF 已知、太阳光入射角恒定的情况下, 靶标的光谱辐亮度也是一个相对恒定的值。因此在本方法中, 灰阶靶标可以替代漫反射板。

通过上述分析可以知, 采用太阳光和灰阶靶标进行室外相对辐射定标在理论和实验方法上是可行的, 其特点体现在: 第一, 由于“两个替代”, 本方法

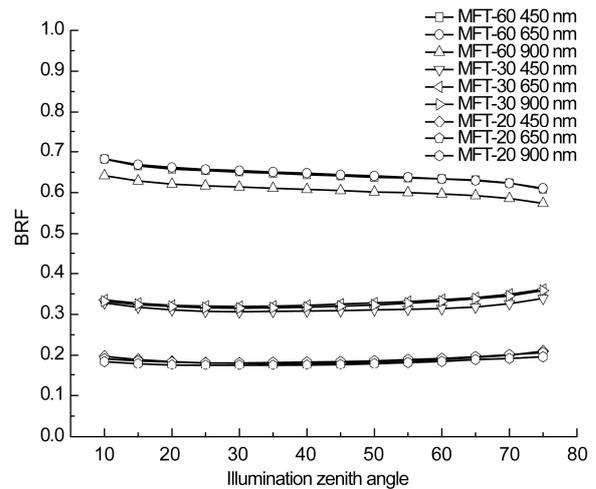


图 2 靶标朗伯性

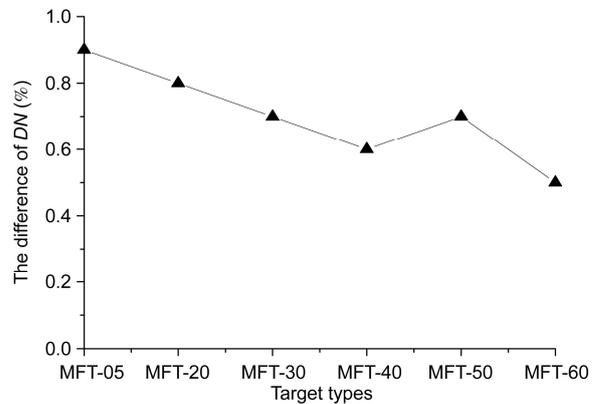


图 3 靶标均匀性

与实验室定标方法相比, 大大简化了定标方法的复杂性和降低实验成本; 第二, 由于使用不同反射率的灰阶靶标, 本方法与以往的单一辐亮度室外定标方法相比, 可以在一种光照条件下获取多个辐亮度等级的实验图像, 大大降低了定标的误差; 第三, 由于本方法对环境要求较低、操作简便, 可以在传感器飞行前后快速完成, 避免了仪器运输、颠簸等因素导致的实际参数与实验室定标结果的不一致, 因此能够最大限度获取与真实工作状态一致的传感器性能指标。

3 室外相对辐射定标实验

采用本文提出的室外相对辐射定标方法, 对中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的宽视场多光谱相机进行了相对辐射定标。由于相对辐

射定标是绝对辐射定标的基础, 因此, 在多光谱相机刚刚结束无人机绝对辐射定标飞行实验^[21]后, 实验人员立即在机场室外对相机进行了相对定标. 实验获取了相机4个波段的相对辐射定标系数, 利用该套系数对原始遥感影像进行处理, 获得了相对辐射校正后的影像. 最后, 通过评价校正后影像上地面均匀靶标的像素一致性, 对相对辐射定标的精度进行了评价. 实验流程如图4所示.

3.1 实验条件

1) 光源及环境: 在太阳光条件下进行, 正午时间, 晴朗天气, 太阳周围 90° 立体角内淡积云量, 无卷云、浓积云. 若数据采集过程中发生天空状况的突变, 实验数据作废, 待气象条件稳定后重新测量. 实验场地开阔, 实验系统周围无杂物, 实验人员着深色服装.

2) 灰阶靶标: 反射率从低到高分别为 5%, 30%, 60% 的 3 块靶标, 每块靶标实验前均经过了严格的出厂测试, 材料均一性、朗伯性好, 光谱变化平缓, 在 400~1000 nm 波段范围内的光谱反射率变化小于 6%.

3) 待测相机及相机控制系统: 相机为线阵推扫式, 共 4 个波段, 每个波段为 1 个线阵 CCD 组成, 旁向尺寸为 6000 个探元. 光谱范围为 420~900 nm, 工

作频率为 50~100 Hz, 分辨率为 0.7 m(相对航高 3500 m). 其他性能参数如表 1 所示.

4) 地物光谱仪: 使用美国 SVC HR-1024 便携式地物光谱仪, 光谱范围: 350~2500 nm, 光谱分辨率: ≤ 3.5 nm(350~1000 nm), ≤ 8.5 nm(1000~1850 nm), ≤ 6.5 nm(1850~2500 nm).

5) 相机支架: 本次实验在相机总装状态的无人机机身下进行, 因此相机支架省略. 相机位于机身前侧, 高度 0.8 m, 成像宽度为 0.4 m(相机旁向全视场角 $2\omega=30^\circ$). 为避免无人机对太阳光均匀性的影响, 相机周围的机身用不反光的黑布进行了包裹.

3.2 实验过程

3.2.1 靶标图像获取

首先, 依次获取 3 块灰阶靶标的实验图像. 将总装状态下的无人机放置在开阔场地, 调整飞机头部使之面向太阳, 避免机身对相机遮光. 将靶标平放在相机下方的地面, 使靶标充满相机的整个视场, 完成相机总装状态的所有软硬件调试. 开机预热, 等相机状态稳定后开始拍摄, 设定一个标准幅影像时间为 10 s. 由于多光谱相机为线阵扫描方式, 并且与靶标均为静止状态, 因此相机将对靶标的固定位置进行重复扫描, 按照时间序列存储线阵影像, 最终形成一个标准幅影像. 在此时间段内, 采用 SVC 光谱仪在相机视场外的靶标区域进行靶标辐亮度的监测, 辐亮度曲线通过与光谱仪连接的电脑显示. 若发现异常, 需重新拍摄, 保证拍摄期间光照的稳定性. 第 1 块靶标拍摄完毕, 将靶标撤出, 并快速将第 2 块靶标放在原位. 在更换靶标的过程中, 由于时间较短, 相机可保持扫描状态, 该过程记录的图像在数据处理时删除, 每块靶标只保留正式拍摄 10 s 内的标准幅影像. 重复上述过程, 直至完成第 3 块靶标的拍摄.

与星载传感器的相对辐射定标不同, 航空线阵传感器的行频是不固定的, 通常会随着飞机的飞行高度、速度而变化, 导致在相同的入射辐射条件下输

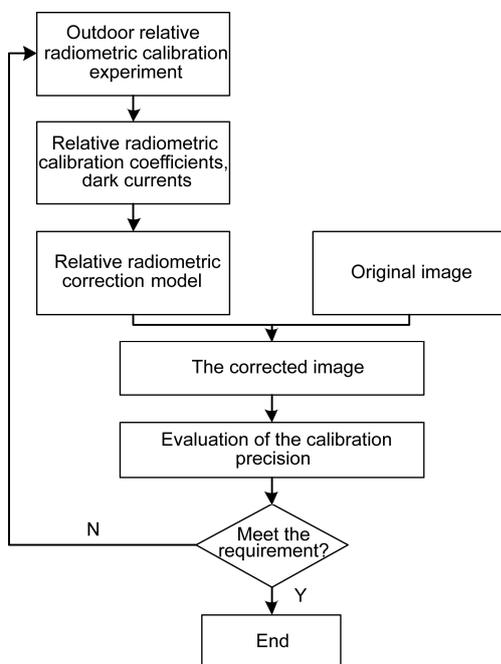


图 4 相对辐射定标与影像校正流程

表 1 多光谱相机性能参数

Band No.	Spectral range
Band 1(blue)	420~520 nm
Band 2(green)	520~600 nm
Band 3(red)	630~690 nm
Band 4(near-infrared)	760~900 nm

出的 DN 值不同^[23], 因此本实验还要充分考虑相机行频这一重要设置. 为确保定标实验能够覆盖相机的行频变化范围, 相机分别在 40, 60, 80, 100 Hz 的行频下获取了实验图像.

之后, 用黑绒布将相机镜头包裹住, 使之不漏光, 分别获取了相应行频下的暗电流图像.

3.2.2 定标系数计算

使用 3.2.1 节中获取的实验图像, 可计算 40, 60, 80, 100 Hz 行频的相机定标系数. 考虑到 3.2.3 节的影像校正需要, 通过查看重点航飞区的遥感影像的辅助文件, 可知每一行影像的行频在 80 Hz 左右的范围内, 因此, 计算 80 Hz 行频的相机定标系数如下.

首先, 选择行频 80 Hz 的暗电流图像, 将图像每列求平均, 得到的 6000 个平均值作为该线阵 CCD 的暗电流数据. 4 个波段的暗电流数据如图 5 所示.

第二, 选择行频 80 Hz 的靶标图像, 采用多帧平均的方法计算出每个探元生成的所有像元 DN 值的平均值, 得到各个辐亮度等级靶标图像的平均行, 然后

减去暗电流. 利用(2)式, 采用最小二乘法计算出第 i 个探元的拟合系数 a_i 和 b_i .

蓝光波段(Band 1)的靶标图像如图 6 所示. 从目视判断, 影像边缘成像质量较差, 整体未出现明显的条带噪声, 只有一些细条带. 影像的上述问题是 CCD 制造工艺、镜头质量、不同观测角对像平面照度的影响、镜头遮光罩等多种原因造成的, 将其视为相机系统的综合影响, 用定标系数表示. 4 个波段的增益系数如图 7 所示.

由图 6 和 7 可知, 该套增益系数对响应较差的 CCD 两侧进行了增强, 对中后部的 CCD 探元响应进行了抑制, 实现了将 CCD 探元响应归一化的效果.

3.2.3 无人机遥感影像的相对辐射校正

原始遥感影像为国家“863”计划重点项目“无人机遥感载荷综合验证系统”中无人机航空平台在内蒙古定标场获取的多光谱影像.

选择影像的一块均匀区进行分析. 将遥感影像 DN 值减去暗电流, 与定标测试图像的 DN 值减去暗

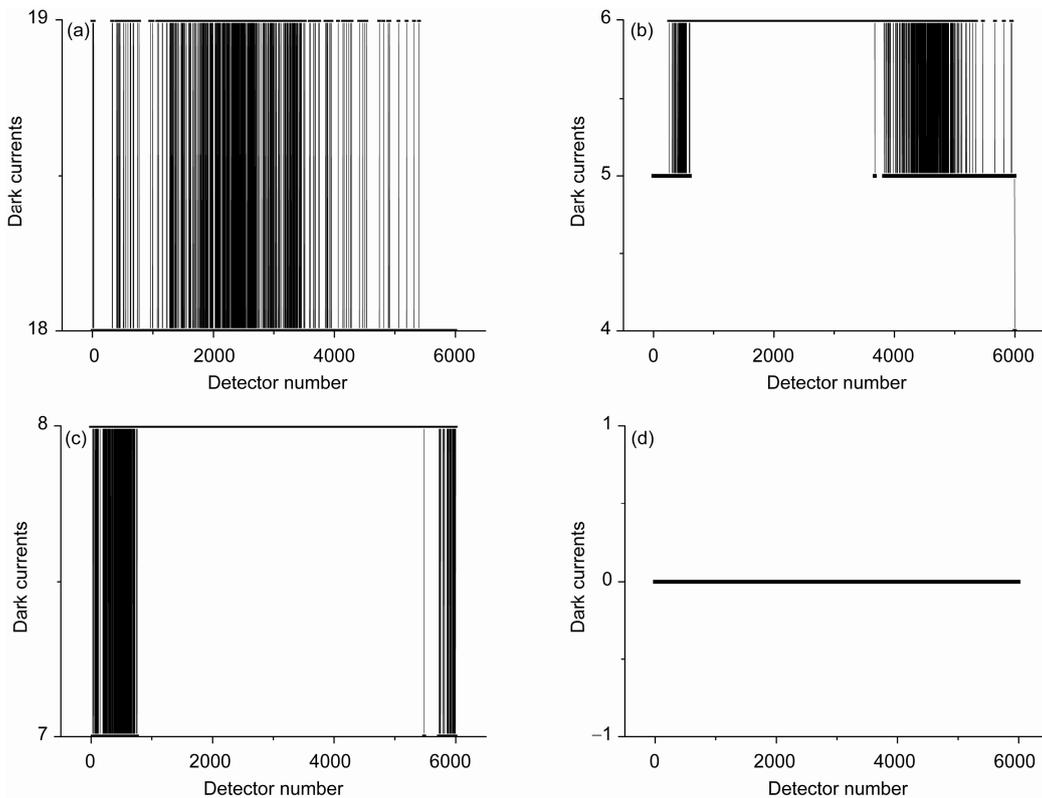


图 5 多光谱相机 4 个波段的暗电流数据
(a) Band 1; (b) Band 2; (c) Band 3; (d) Band 4



图6 Band 1的靶标图像

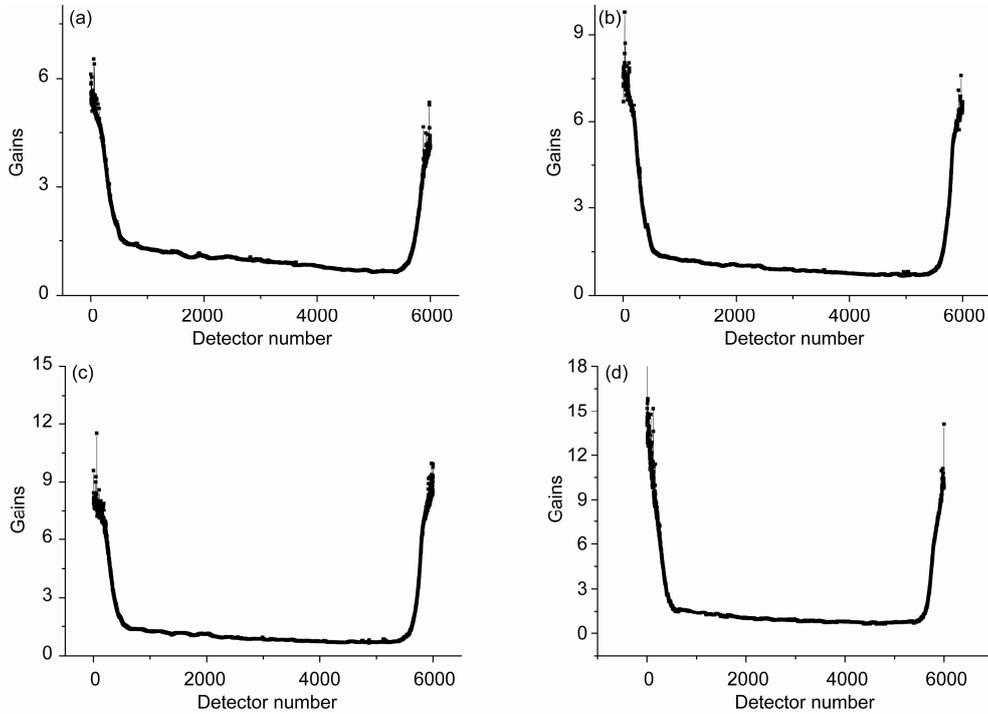


图7 多光谱相机4个波段的增益系数
(a) Band 1; (b) Band 2; (c) Band 3; (d) Band 4

电流进行比对. 图8为两组数据归一化的结果(黑线断点处为两类不同均匀地物的交界处), 由图8可知, 定标实验测出的 CCD 响应不均匀性与遥感影像上反映出的 CCD 响应不均匀性在趋势上基本一致, 部分区域存在的平移性的偏差是由于影像几何畸变等因

素造成的. 因此, 可以通过定标系数对遥感影像进行相对辐射校正.

根据(1)式对原始遥感影像进行校正. 为对比校正前后的效果, 在校正前、后的影像上随机选取同一行地物的 DN 值, 如图9所示. 由图9中可以看出, 原

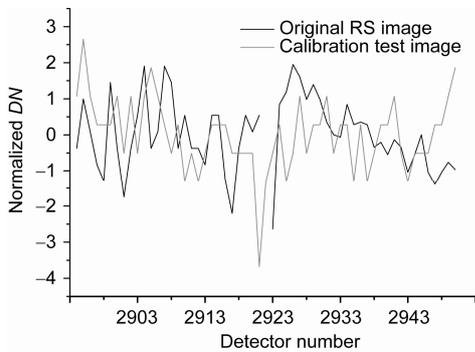


图8 原始遥感影像与定标测试图像的不均匀性对比

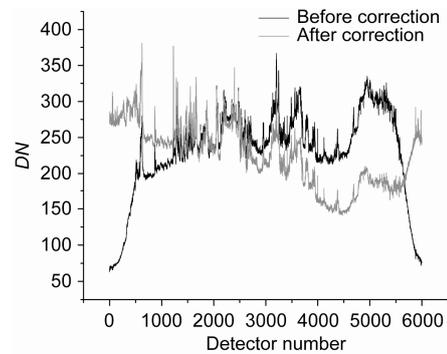


图9 校正前与校正后数据的对比

始影像整体偏亮, 边缘偏暗, 校正后的影像对边缘进行了增强, 对影像亮部进行了抑制, 对暗部进行了增强. 校正前、后的农田场景如图 10 所示. 由图 10 中可以看出, 影像左侧边缘的地物在原始影像上无法分辨, 在校正后的影像上可以清晰辨认, 校正后的影像层次分明, 具有更加丰富的纹理信息.

4 定标精度评价

国内外在计算相对定标精度时, 通常是先对整幅影像的各个探元输出的一列 DN 值取平均值, 得到一个平均值行, 然后针对该行利用各种指标评价相对定标精度^[24, 25]. 其不足之处在于地面场景的不均匀性会对评价结果产生影响.

本文采用地面布设的大面积均匀靶标的遥感影像计算定标精度, 充分利用了飞行试验中布设的人工靶标作为均匀地物, 来评价相对辐射定标的有效性. 该方法可以有效解决高分辨率影像的复杂场景对影像均匀性评价的干扰问题.

飞行实验当天, 天空晴朗无云, 能见度达到 30 km, 可忽略大气对靶标均匀性的影响, 将靶标视为理想均匀的地面参照物. 地面上航线范围内共布设了 5%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 六种反射率的灰阶靶标, 靶标的特性与室外相对辐射定标中使用的灰阶靶标完全一致, 仅存在尺寸上的差异. 上述靶标经过了严格的出厂测试, 每块靶标的材料均一性、朗伯性好, 光谱变化平缓, 在 400~1000 nm 波段范围内的光谱反射率变化小于 6%. 其中 60% 靶标与 5% 靶标大小为 20×20 m, 其余灰度等级的靶标大小为 15×15 m. 在 3.5 km 的相对航高下, 5% 和 60% 靶标约占 28×28=

784 个像元, 其余灰度等级的靶标分别占 21×21=441 个像元, 靶标区所有靶标如图 11 所示, 标有不同反射率的靶标为选用的灰阶靶标.

选取地面 6 块灰阶靶标影像, 分别采用平均行标准差法^[26]进行定量评价. 计算过程如下: 先计算相对辐射校正后图像每列的平均值, 得到一个平均行; 然后计算该行数据的标准差, 再除以整幅图像的平均值, 即为该图像计算得到的相对定标精度. 设待评价的图像大小为 m 行× n 列, 通过该幅图像计算得到的相对定标精度为 RA :

$$RA = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (DN_j - \overline{DN})^2 / n}}{\overline{DN}} \%, \quad (3)$$

$$DN_j = \frac{\sum_{i=1}^m DN_{ij}}{m}, \quad (4)$$

其中 DN_{ij} 为图像第 i 行 j 列像元的灰度值, DN_j 为图像平均行第 j 个像元的灰度值, \overline{DN} 为整幅图像的平均值.

多光谱相机 4 个波段的相对辐射定标精度如图 12 所示. 图 12(a)给出了蓝光波段(Band 1)相对辐射校正后的影像上 6 块靶标的平均行数据, 利用(3)和(4)式, 可计算出靶标编号 MFT-05 的 RA 为 0.77%, MFT-20 的 RA 为 0.54%, MFT-30 的 RA 为 0.57%, MFT-40 的 RA 为 0.51%, MFT-50 的 RA 为 0.56%, MFT-60 的 RA 为 1.08%. 6 块靶标的的数据可统计出, RA 的最大值为 1.08%, 最小值为 0.51%, 蓝光波段的相对辐射定标精度可达到 1.08%.

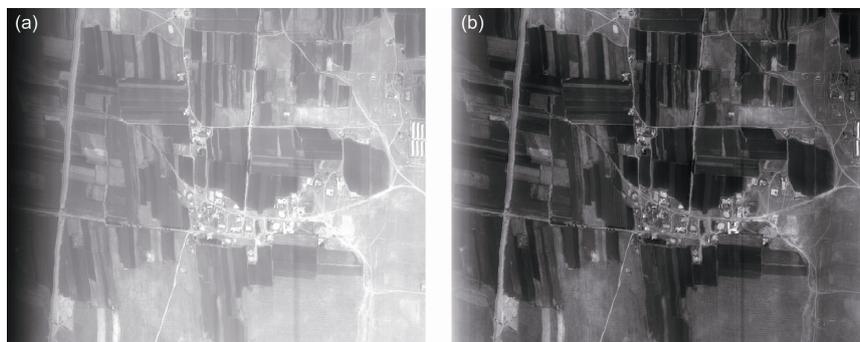


图 10 农田场景的相对辐射校正前后
(a) 校正前; (b) 校正后

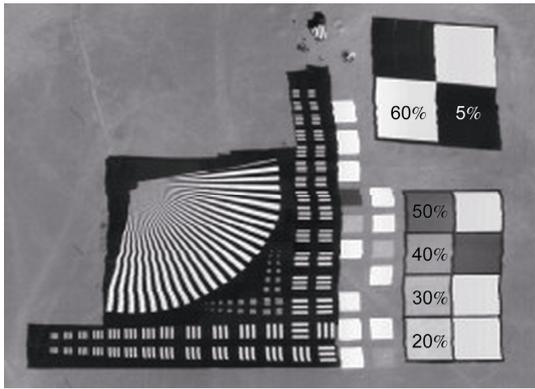


图 11 地面靶标

按照上述方法, 对相机的 Band 2~4 的数据分别进行分析和统计, 得到结果如表 2 所示. 蓝光波段的相对辐射定标精度可达到 1.08%, 绿光波段的相对辐射定标精度可达到 0.74%, 红光波段的相对辐射定标精度可达到 0.99%, 近红外波段的相对辐射定标精度可达到 1.48%. 从波段之间进行对比, 绿光和红光波段的校正效果最好, 蓝光波段次之, 近红外波段最差,

其原因可能是近红外波段的响应非线性、各探元响应特性曲线随着工作温度的变化存在不同程度的直流漂移等因素的影响.

对相对辐射定标精度整体评价, 由图 12 和表 2 可知, 多光谱相机的相对辐射定标精度整体可达到 1.48%, 部分可达到 0.00% (即完全校正了 CCD 的非均匀性), 而通常工程上对相对辐射定标精度的要求为优于 5%, 传统的定标方法精度为 2%~3.4%. 因此可以证明本文提出的室外定标方法完全满足相对辐射定标的精度要求, 且具有较高精度, 为下一步的绝对辐射定标提供了符合要求的影像.

为评价相对辐射校正后的效果, 本文对原始遥感影像的 6 块靶标的 RA 也进行了统计, 结果如表 3 所示, 其中“Band 1 后”表示校正后, “Band 1 前”表示校正前, 依此类推. 统计表明, 相机 4 个波段校正后的 RA 小于校正前, 证明了经过校正, 影像的均匀性得到了有效的改善, 不仅证明了相对辐射定标的效果, 而且也从另一个角度说明了该评价方法的有效性.

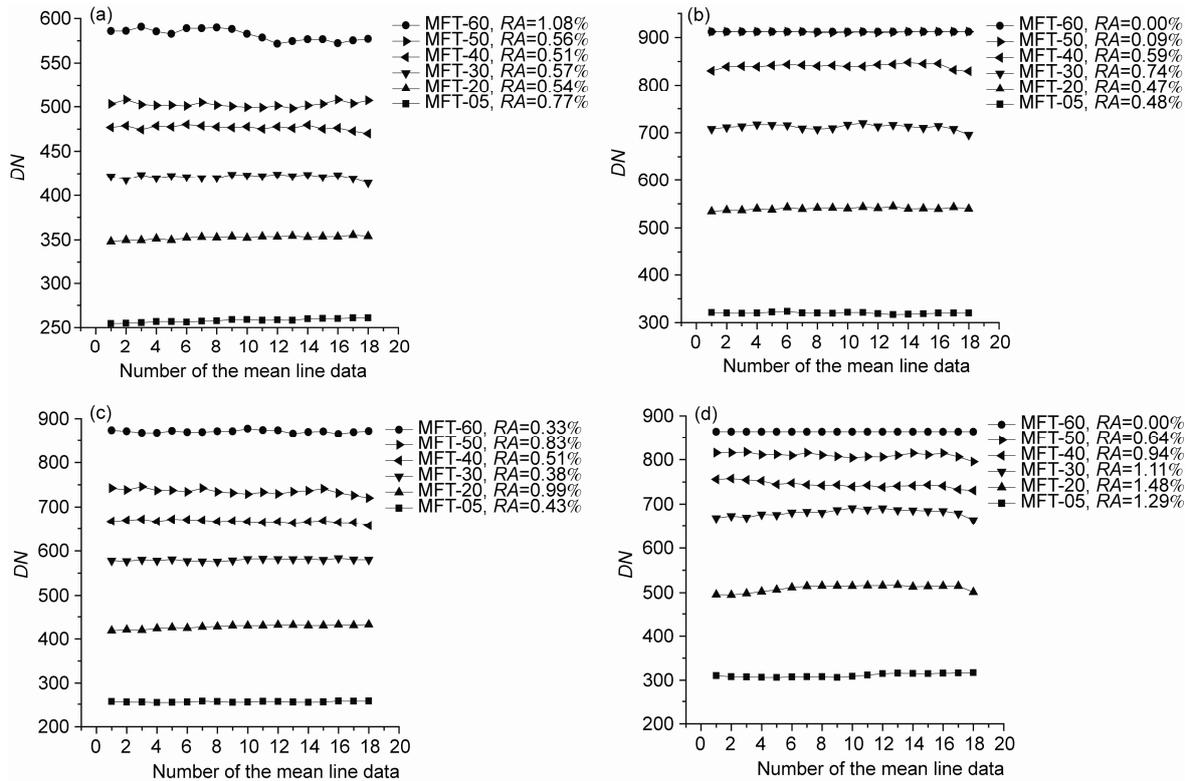


图 12 6 块靶标的平均行数据及多光谱相机 4 个波段的定标精度
(a) Band 1; (b) Band 2; (c) Band 3; (d) Band 4

表 2 定标精度统计

Precision	Blue band	Green band	Red band	Near-infrared band
RA_{\min}	0.51%	0.00%	0.33%	0.00%
RA_{\max}	1.08%	0.74%	0.99%	1.48%

表 3 校正前后靶标均匀性对比

No.	Band 1 after	Band 1 before	Band 2 after	Band 2 before	Band 3 after	Band 3 before	Band 4 after	Band 4 before
MFT-60	1.0754%	1.0791%	0	0	0.3336%	0.3361%	0	0
MFT-50	0.5570%	0.5667%	0.0909%	0.0996%	0.8347%	0.8359%	0.6443%	0.6511%
MFT-40	0.5109%	0.5183%	0.5897%	0.5978%	0.5129%	0.5298%	0.9427%	0.9474%
MFT-30	0.5727%	0.5768%	0.7394%	0.7396%	0.3796%	0.3861%	1.1101%	1.1186%
MFT-20	0.5435%	0.5533%	0.4730%	0.4821%	0.9911%	0.9943%	1.4832%	1.4875%
MFT-05	0.7667%	0.7741%	0.4827%	0.4842%	0.4318%	0.4397%	1.2868%	1.2892%

5 结论

针对 CCD 探元响应的不均匀问题, 本文提出了一种基于灰阶靶标的室外相对辐射定标方法, 使用该方法对多光谱相机进行了相对辐射定标. 使用获得的相对辐射定标系数对飞行获取的原始遥感影像进行了相对辐射校正, 并利用影像中的人工靶标进行了定标精度评价. 根据本文实验结果, 得到如下结论.

1) 基于灰阶靶标的室外相对辐射定标方法, 可在一种光照条件下获取多个辐亮度等级的实验图像, 提高定标精度. 实验结果表明, 该方法的定标精度可达到 1.48%, 完全满足工程中要求的优于 5% 的指标.

2) 通过对太阳光与灰阶靶标光学特性的研究, 发现在晴朗空旷室外条件下, 太阳光满足相对辐射定标全视场照度的不均匀性小于 5% 的要求, 可替代积分球光源; 灰阶靶标各点的灰度差异小于 1%, BR

的平均差异小于 0.2%, 其均匀性和朗伯性满足相对辐射定标要求, 可替代漫反射板.

3) 利用外场布设的人工靶标, 对本文提出的相对辐射定标方法进行评价, 校正前后遥感影像的统计分析结果表明, 这一评价方法能够克服传统评价方法中高分辨率遥感影像复杂场景对精度评价的干扰, 可为其他相对辐射定标方法的评价提供参考. 在今后的实验中, 可采用分散布设靶标的方法, 或寻找贯穿影像穿轨方向的河流、公路作为参照, 对影像均匀性进行评价.

相对辐射定标是保证遥感影像质量的关键步骤. 本文提出的相对辐射定标方法, 尽管有其优势和特点, 但是大气状况的突变、现场人员走动、实验系统周围反射体、实验人员操作不当等多种因素的影响不容忽视, 应注意实验流程的规范性, 保证实验结果的有效性和精度.

参考文献

- Gong P. Some essential questions in remote sensing science and technology. *J Remote Sens*, 2009, 13: 13–23
- 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 环境卫星 HJ-1A 超光谱成像仪在轨辐射定标及真实性检验. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40: 1312–1321
- 汪左, 肖鹏峰, 顾行发, 等. HJ-1 星 CCD 相机交叉定标不确定性分析. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 229–240
- Dingirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review. *Remote Sens Environ*, 1999, 68: 194–205
- Pahlevan N, Schott J R. Characterizing the relative calibration of Landsat-7 (ETM+) visible bands with Terra (MODIS) over clear waters: The implications for monitoring water resources. *Remote Sens Environ*, 2012, 125: 167–180
- Koukal T, Suppan F, Schneider W. The impact of relative radiometric calibration on the accuracy of kNN-predictions of forest attributes. *Remote Sens Environ*, 2007, 110: 431–437
- Markham B L, Schafer J S, Wood J F M, et al. Monitoring large-aperture spherical integrating sources with a portable radiometer during satellite instrument calibration. *Metrologia*, 1998, 35: 643–648
- Zhang L F, Huang C P, Wu T X, et al. Laboratory calibration of an outdoor imaging spectrometer system. *Sensors*, 2011, 11: 2408–2425
- Xiong X X, Sun J Q, Barnes W L. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS reflective solar bands. *IEEE T Geosci Remote*, 2007, 45: 879–889

- 10 Arai K, Hook S, Kieffer H, et al. ASTER preflight and in-flight calibration and the validation of Level 2 products. *IEEE T Geosci Remote*, 1998, 36: 1161–1172
- 11 Chander G, Helder D L, Markham B. Landsat-5 TM reflective band absolute radiometric calibration. *IEEE T Geosci Remote*, 2004, 42: 2747–2760
- 12 Li X Y, Gu X F, Min X J, et al. Radiometric cross-calibration of the CBERS-02 CCD camera with the Terra Modis. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2005, 48(Supp.I): 44–60
- 13 Bindschadler R, Choi H. Characterizing and correcting HyPerion detectors using ice-sheet images. *IEEE T Geosci Remote*, 2003, 41: 1189–1193
- 14 Kumar R, Bhowmick S A, Babu K N, et al. Relative calibration using natural terrestrial targets: A preparation towards Oceansat-2 scatterometer. *IEEE T Geosci Remote*, 2011, 49: 2268–2273
- 15 Thome K, Czaplá-Myers J, Kuester M, et al. Accuracy assessment for the radiometric calibration of imaging sensors using preflight techniques relying on the sun as a source. In: *Proceedings of SPIE. Bellinham: Spie-Int Soc Optical Engineering*, 2008. 7081: 708118
- 16 Anderson N, Biggar S, Thome K, et al. Solar radiation- based calibration of laboratory grade radiometers. In: *Proceedings of SPIE. Bellinham: Spie-Int Soc Optical Engineering*, 2007. 6677: 66770X
- 17 Kuester M, Czaplá-Myers J, Kaptchen P, et al. Development of a heliostat facility for solar-radiation-based calibration of earth observing sensors . In: *Proceedings of SPIE. Bellinham: Spie-Int Soc Optical Engineering*, 2008. 7081: 708119
- 18 袁亚飞, 张亚, 杨亦强, 等. 太阳模拟器光照不均匀性的研究. *宇航计测技术*, 2011, 31: 73–77
- 19 杨本永, 张黎明, 陈洪耀, 等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计. *光学学报*, 2009, 29: 3545–3550
- 20 Yan L, Duan Y N, Gou Z Y, et al. Design and optical characteristics test of airborne remote sensing calibration targets. *J Remote Sens*, 2012, 16: 1222–1232
- 21 杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量. *光学精密工程*, 2009, 17: 1851–1858
- 22 Chen W, Yan L, Li Z Q, et al. In-flight absolute calibration of an airborne wide-view multispectral imager using a reflectance- based method and its validation. *Int J Remote Sens*, 2013, 34: 1995–2005
- 23 周春城, 李传荣, 胡坚, 等. 基于行频变化的航空高光谱成像仪相对辐射校正方法研究. *遥感技术与应用*, 2012, 27: 33–38
- 24 Krause K S. QuickBird relative radiometric performance and on-orbit term trending. In: *Proceedings of SPIE. Bellinham: Spie-Int Soc Optical Engineering*, 2006. 6296: 62960P
- 25 Krause K S. Relative radiometric characterization and performance of the Quickbird high-resolution commercial imaging satellite. In: *Proceedings of SPIE. Bellinham: Spie-Int Soc Optical Engineering*, 2004. 5542: 35
- 26 胡永富, 张宇烽. 空间相机相对辐射定标精度分析. *航天返回与遥感*, 2007, 28, 54–57