

无人机多光谱传感器场地绝对辐射定标研究

陈伟^{1, 2, 3}, 晏磊^{1, 2, 3*}, 勾志阳^{1, 2, 3}, 赵红颖^{1, 2, 3}, 刘大平^{1, 2, 3}, 段依妮^{1, 2, 3}

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

摘要 2010年10月14日无人机遥感载荷验证场科学实验在内蒙古乌拉特前旗展开, 这是我国首个航空遥感定标验证场的首次科学实验。通过验证场实验数据及制作的朗伯特特性好的六块高光谱辐射特性靶标, 采用反射率基法对搭载在无人机平台上的宽视场多光谱相机进行了场地绝对辐射定标。结果显示, 对于成功获取影像的绿光、红光及近红外通道的绝对定标结果中, 计数值(DN值)与辐射传输计算得出的表观辐亮度之间的线性相关系数优于99%。经误差分析得到不确定度为5.19%, 优于验证场课题要求的6%。定标结果表明, 验证场所配备之高光谱辐射特性靶标适用于机载多光谱载荷的场地绝对定标, 且定标结果可靠, 可以用于地物参数的反演。

关键词 辐射定标; 反射率基法; 表观辐亮度; 辐射特性靶标

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)12-3169-06

引言

伴随着遥感技术在各领域的深入发展与应用, 遥感定量化成为遥感学科发展的前沿与趋势^[1, 2]。而遥感定量化的基础是遥感数据的辐射定标。辐射定标是建立空间相机入瞳处辐射量与探测器输出量的数值相联系的过程, 包括相对辐射定标与绝对辐射定标过程。绝对定标过程是指将表征传感器响应的DN(digital number)值转换为表征地球物理参量的物理量^[3]。在可见光与近红外波段, 绝对辐射定标是将传感器响应的DN值转换为传感器入瞳处的表观辐亮度。传感器的绝对辐射定标是遥感定量化的基础, 是实现多源数据同化的前提, 是不同时期遥感数据应用的纽带, 对遥感应用具有重要意义^[4, 5]。

目前卫星传感器在轨辐射定标已经蓬勃开展, 国外遥感大国早在20世纪70年代已经开展遥感传感器的在轨辐射定标。位于美国新墨西哥州的白沙定标场被用以对Landsat TM系列卫星传感器进行绝对辐射定标^[6], 法国在马赛附近的La Crau建立了试验场对Spot HRV传感器进行了在轨辐射定标^[7]。目前在太阳反射波段, 传感器绝对辐射定标不确定度最高可达3%~5%, 而国内一般可达到6%~7%。国内

由国家卫星气象中心牵头, 利用位于敦煌的遥感卫星辐射校正场对风云系列卫星进行了在轨辐射定标, 并使得绝对定标精度达到7%^[8]。

虽然我国星载遥感绝对辐射定标场研究与建设发展迅猛, 但是国内尚缺乏专门的航空遥感定标场对机载传感器进行场地绝对辐射定标, 从一定程度上限制了机载遥感数据的定量化应用。无人机遥感载荷综合验证场是我国第一个专门应用于航空载荷的遥感定标验证场, 包含有北方与南方两个验证场(北方场位于内蒙古包头市西88 km, 海拔约为995 m)。验证场配有由北京大学研制的多光谱性能靶标15块, 高光谱辐射特性靶标7块, 具有多光谱光学相机场地辐射定标的能力。利用验证场高光谱辐射特性靶标可对试验飞行的宽视场多光谱相机进行在轨绝对辐射定标, 对于今后利用机载遥感数据实现地物信息的定量反演, 实现我国遥感数据自主化应用及提高我国定量遥感科研水平都具有重要意义。

1 方法

传感器的可见光近红外通道场地绝对辐射定标主要方法有反射率基法、辐照度基法(也称改进的反射率基法)和辐亮度基法^[9]。反射率基法是当传感器过境时同步进行地面反射

收稿日期: 2011-03-03, 修订日期: 2012-02-25

基金项目: 国家重点(863计划)项目(2008AA121806)资助

作者简介: 陈伟, 1987年生, 北京大学地球与空间科学学院博士研究生 e-mail: wchen@pku.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: lian@pku.edu.cn

率测量、大气气溶胶特性观测以及气象观测,处理数据获取地面等效反射率、气溶胶光学厚度等参数,将参数输入到 6S 等辐射传输模型中进行计算^[1, 10]。辐照度基法与反射率基法相比还需测量漫射与总辐射比以避开气溶胶模型假设,减少相关误差及不确定性。辐亮度基法是将精确标定的光谱辐射计放在与飞行器等高的位置进行辐射测量,以测量值作为真实接收到的辐亮度并对传感器进行标定。本次无人机宽视场多光谱相机定标采用的方法是反射率基法,其基本流程如图 1 所示。

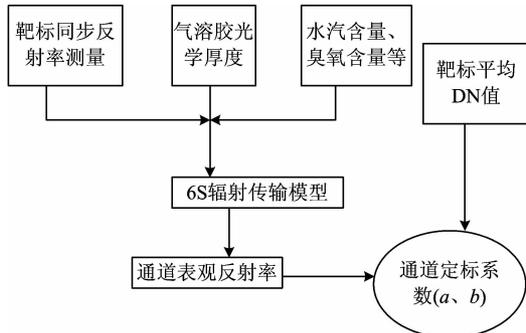


Fig. 1 Flow of reflectance-based absolute radiometric calibration

反射率基法的主要流程是,在无人机飞过验证场靶标区上空时,在场地进行靶标反射率同步测量、大气消光参数测量及探空测量。经过数据处理得到飞机过境时刻同步地面靶标反射率、大气气溶胶光学厚度及大气水汽含量等参数,将这些参数输入到 6S 模型中^[1],这样就可以得到理论上入瞳处的辐亮度,即表观辐亮度。然后将辐射亮度与传感器响应的 DN 值进行最小二乘法拟合即可得到定标系数。

无人机宽视场多光谱相机有 5 个通道,各通道谱带范围如表 1 所示。在试飞过程中,蓝光通道影像获取出现故障,因此无法进行辐射定标;而全色通道缺少光谱响应函数,亦无法对其进行辐射定标。实验仅对绿光、红光及近红外通道三个通道进行处理。无人机航高为 2.5 km,获得影像分辨率约为 0.5 m。

Table 1 Spectral band range of each band of multi-spectral sensor

通道名	蓝光通道/nm	绿光通道/nm	红光通道/nm	近红外通道/nm	全色通道/nm
谱带范围	420~520	520~600	630~690	760~900	475~750

2 高光谱辐射特性靶标及其布设

2.1 高光谱辐射特性靶标

高光谱辐射特性靶标是“无人机遥感载荷综合实验系统”中重要组成部分,利用精确控制的地面人工靶标,是对航飞中的有效载荷进行辐射定标、MTF 和分辨率等辐射特性、图像质量进行评价的重要依据。无人机遥感载荷综合验证场所采用的高光谱辐射特性靶标由北京大学研制。高光谱辐射特

性靶标要求光谱变化平缓,在 400~1 000 nm 波段范围内的光谱反射率变化小于 6%。验证场共配有辐射特性靶标 7 块,其标称反射率分别为 60%(2 块),50%,40%,30%,20%和 4%,其中 60%靶标与 4%靶标大小为 20 m×20 m,其他 4 块靶标大小为 15 m×15 m。

经过室内光谱仪检测确定高光谱辐射特性靶标在 400~1 000 nm 波段范围内的反射率变化均不大于 6%(室内检验结果如图 2 所示,波段范围为 400~1 000 nm),符合场地绝对辐射定标要求。

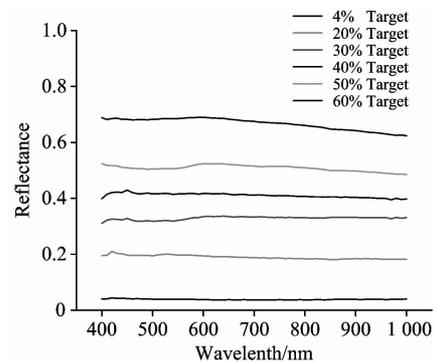


Fig. 2 Laboratory calibration of 6 hyper-spectral radiometric target

2.2 靶标布设

2010 年 11 月 14 日,无人机遥感载荷综合验证场技术研究首次科学实验在内蒙古乌拉特前旗展开。实验铺设了所有类型靶标,包括几何特性靶标(扇形靶标)、辐射特性靶标、多光谱性能靶标。布设方案如图 3(假彩色合成)所示。

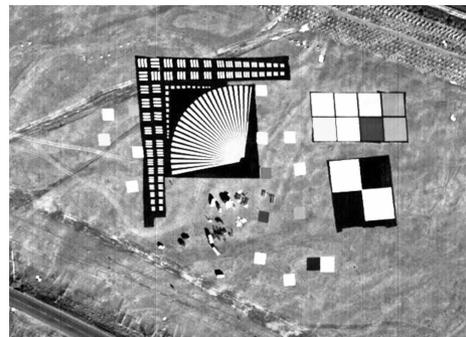


Fig. 3 Target arrangement map

图 3 中部为扇形靶标,其扇形圆心角 114°,半径为 50 m,用以检测多光谱相机几何分辨率;扇形靶标西侧及北侧为三线阵靶标,分为不同分辨率,布设需要设置三线阵靶标方向分别与航迹垂直与平行,检测分辨率 0.05~1.1 m,与扇形靶标同样用以检测几何分辨率;扇形靶标与三线阵靶标东西两侧的小方形靶标为多光谱性能靶标,其光谱变化不平坦,在某些波段有峰值,大小为 7 m×7 m,用以评价多光谱相机性能;图 3 右侧为四块高光谱辐射特性靶标,其标称反射率分别为 50%,40%,30%和 20%(自左向右),其左侧为四块高光谱切边靶标,大小为 15 m×15 m;右下为标称反射率为 60%和 4%的高光谱特性靶标,大小为 20 m×20 m,用

于绝对辐射定标和 MTF 检测。宽视场多光谱绝对辐射定标所使用的靶标为光谱平坦性较好的六块高光谱性能靶标。

3 同步测量及辐射定标结果

3.1 地表反射率获取

2010 年 11 月 14 日进行了无人机宽视场多光谱相机地面同步观测,其时间为无人机过境前后各 1 小时以保证测量为同步或准同步。在无人机过境的同时,利用 ASD 光谱仪对 7 块高光谱辐射特性靶标进行测量。测量时先对参考板测量 2 次,然后在靶标上随机选取 9 个点进行靶标测量,最后再测量一次参考板,整个测量过程不超过 3 min。通过计算即可得到靶标的反射率数据。获取的六块靶标的反射率如图 5 所示。

在进行辐射定标过程中,输入 6S 模型的地表反射率应为通道的等效反射率,即

$$R_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda d\lambda} \quad (1)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为通道的起止波长, S_λ 为通道在波长处的光谱响应, R_λ 是输入到面靶标在波长 λ 处的反射率, R_e 是计算出的通道的等效反射率。计算所得各靶标在各通道等效反射率如表 2 所示。

Table 2 Effective reflectance of each band of targets

	绿光通道等效 反射率/%	红光通道等效 反射率/%	近红外通道等效 反射率/%
4%靶标	4.46	4.44	4.24
20%靶标	16.10	15.67	14.16
30%靶标	27.23	27.54	25.27
40%靶标	34.77	34.52	31.50
50%靶标	42.10	42.25	38.21
60%靶标	51.62	50.68	44.05

3.2 大气参数获取

大气消光参数在地面光谱测量的同时进行,采用测区南部(无场地影响且无遮挡)。实验采用 Langly 法进行 550nm 处大气气溶胶光学厚度的获取^[11]。Langly 法的原理是假设大气总光学厚度(包括瑞利光学厚度和气溶胶光学厚度)与到达地面的太阳直射辐照度有如下关系

$$E = E_0 d_s e^{-m\tau} \quad (2)$$

式中, E 为到达地面的太阳直射辐照度, E_0 为大气上界太阳辐照度, d_s 为日地距离订正因子, m 为大气光学质量。 d_s 可以根据儒历天数计算得出,而 m 则可根据太阳天顶角与大气压计算得出。设地面光度计接收到的电压信号(V)正比于到达地面的辐照度 E ,即($E \propto V$),对式(2)取自然对数可得

$$\ln E - \ln d_s = \ln E_0 - m\tau \quad (3)$$

由于 E_0 在一天中可以视为常数, m 为大气质量数,可以计算出总光学厚度 τ 。由于所选择的波段水汽和臭氧吸收贡献很小,该两项可忽略,大气总光学厚度近似由瑞利光学

厚度和气溶胶光学厚度构成

$$\tau = \tau_a + \tau_{\text{ray}} \quad (4)$$

式中, τ_a 为气溶胶光学厚度, τ_{ray} 为瑞利光学厚度,瑞利光学厚度可以由气压数据计算得出。

经过计算得知无人机过境时刻 550 nm 处大气气溶胶光学厚度为 0.075,其日变化如图 4 所示。结果表明,实验当日 550 nm 处气溶胶光学厚度的日变化在 0.03~0.09 之间,大气较为干洁,非常适合于载荷的场地绝对辐射定标。根据当天天气状况,假定当地大气类型为中纬度冬季,气溶胶类型选择沙漠型。臭氧含量则根据 NASA 的 OMI 数据确定。

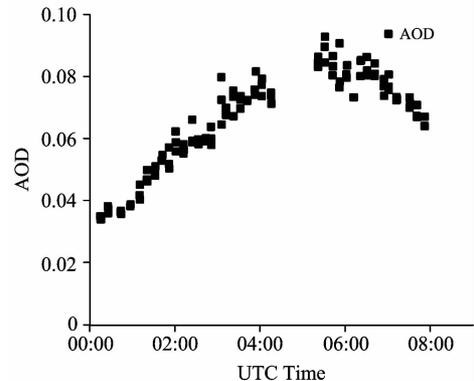


Fig. 4 Aerosol optical depth on Nov. 14th, 2010

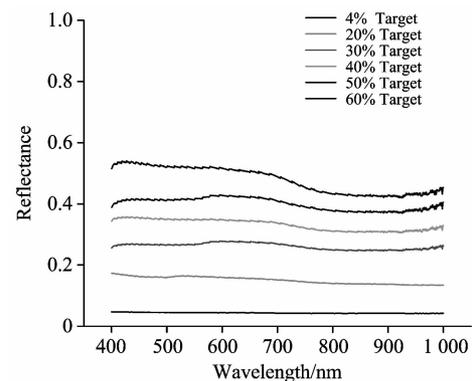


Fig. 5 *In-situ* measurements of 6 hyper-spectral radiometric targets

3.3 辐射传输过程计算

目前国际上用于场地绝对辐射定标的辐射传输模型主要有 6S 和 MODTRAN, 6S 适用范围为 0.3~4.0, MODTRAN 适用范围为 0.3~100。拟采用辐射传输模型 6S,其基本原理是假设传感器入瞳处表现反射率可以表达为

$$\rho^* = \frac{\pi L^* d_s^2}{E_0 \cos \theta_s} \quad (5)$$

式中, ρ^* 为表现反射率, d_s 为日地距离订正因子, E_0 则是大气外界的太阳辐照度。由式(5)可以推算出表现反射率与表现辐亮度之间的基本关联。

由于铺设的高光谱辐射特性靶标朗伯性较好,且试验传感器为天顶观测,因此表现反射率与地表反射率有如下关系

$$\rho^* = \left\{ \left[\rho_s + \frac{\rho_s}{1 - \rho_s} T(\theta_s) T(\theta_v) \right] \right\} T_g \quad (6)$$

式中, ρ^* 为多光谱传感器各通道接收的表现反射率, ρ_a 为大气自身贡献, ρ_s 为地表反射率, S 为大气半球反射率, $T(\theta_s)$ 为太阳-地表大气透过率, $T(\theta_v)$ 为地表-传感器大气透过率, T_g 为吸收气体透过率。

计算得当时太阳天顶角为 60.47° , 太阳方位角为 163.73° , 输入表 1 中靶标各通道的等效反射率, 设地表类型为朗伯体, 再将模型需要的大气参数输入到 6S 模型中, 即可计算得出传感器的表现反射率, 再根据式(5)得出传感器入瞳处辐亮度。选取靶标中心部分约 10×10 大小的像元取平均计算得出每块靶标的平均 DN 值。利用计算得出的表现辐亮度与平均 DN 进行最小二乘法进行线性拟合, 即可得到定标系数, 定标公式为

$$L_i = a \times \text{DN} + b \quad (7)$$

式中, a 和 b 分别为定标系数中的增益和偏置。

三个通道的辐射定标结果如图 6、图 7 和图 8 所示: 结果显示, 三个波段辐射定标结果线性度非常好, 其相关系数均达到 99%。

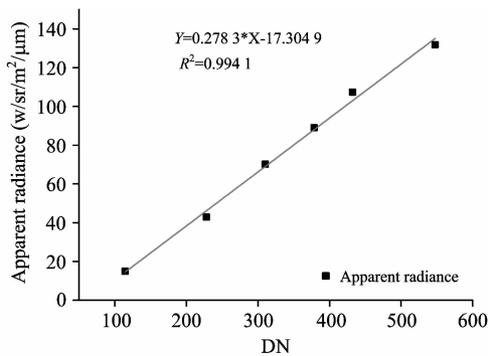


Fig. 6 Absolute calibration result of green channel

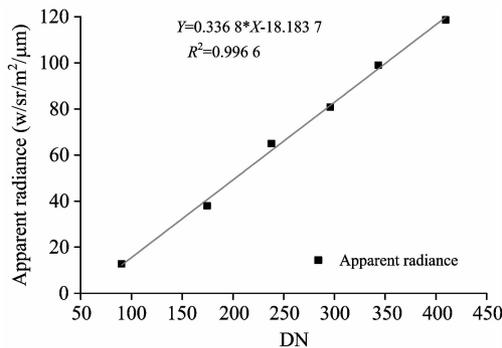


Fig. 7 Absolute calibration result of red channel

4 分析与讨论

如图 6—图 8 所示的绝对辐射定标结果, 初步可以确定, 在成功获取影像的三个通道中, 在地面铺设靶标所涉及 $4\% \sim 60\%$ 反射率范围内, 传感器线性响应度较高。反射率基法的场地绝对定标中, 影响定标的因素有很多, 如地面反射率测量误差、大气气溶胶参数测量误差和辐射传输模型误差等^[12]。目前对辐射定标不确定度的计算方法是通过对各误差分量的均方和的根来表示。地面反射率误差在总体误差计算

中贡献最大, 可认为其误差贡献几乎是等量传递^[11], 6S 固有精度贡献其次, 太阳辐射强度变化与大气光学厚度测量、大气气溶胶类型选择及地表朗伯性也对绝对辐射定标不确定度有贡献。

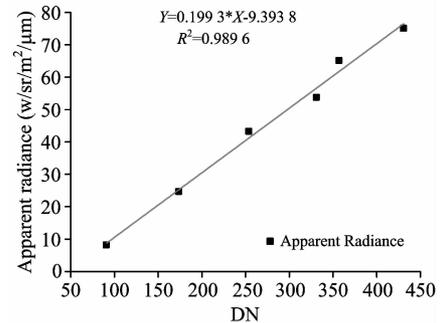


Fig. 8 Absolute calibration result of infrared channel

地表反射率的不确定度在总不确定度计算中贡献最大, 其来源有四项: (1)参考板定标不确定度; (2)参考板非水平放置误差; (3)测量固有不确定度; (4)靶标非朗伯性误差。在实验前参考板已经经过定标, 其不确定度小于 2% 。测量中参考板需要水平放置, 但实际测量中因要保证测量速度及现场条件限制无法保证参考板放置水平。考虑到现场环境的平均坡度在 3 度左右, 参考板放置水平倾角在 3 度以内。经计算, 由于参考板放置非水平所带来的不确定度小于 1% (在 $400 \sim 1000$ nm 波段内), 如图 9 所示。亚历桑那大学 Biggar 提出, 测量本身所带来的误差约为 0.5% ^[12], 国内从事定标专业人员一般认为在进行地面反射率测量时的误差约为 2% ^[8, 11, 13], 因测量规范与仪器水平与国内研究人员相似, 本文认定在测量中因测量产生的误差约为 2% 。靶标非朗伯性对测量所得反射率不确定度影响来自两个方面, 一为测量时仪器探头不可能完全垂直测量, 二为传感器观测靶标非天顶观测。在本次科学实验中, 无人机在靶标上空过境, 且靶标相对尺寸远小于航高, 可近似认定传感器为垂直观测。实际测量中靶标非朗伯性的影响即为探头测量时测量并非垂直向下观测。实际测量中, 认定测量探头与垂直方向夹角不大于 3° 。根据高光谱性能靶标 BRF 参数, 可得在此范围内测量反射率与天顶方向反射率之间的误差较小, 不大于 1.8% 。可认定, 因靶标非朗伯性带来的不确定度小于 1.8% , 如图 10 所示。

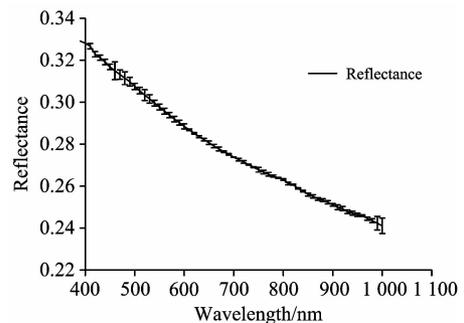


Fig. 9 Error contribution of reference panel

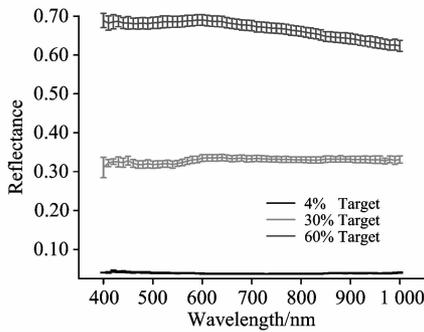


Fig. 10 Error contribution of targets' non-lambertian property

气溶胶光学厚度与气溶胶类型选择对定标结果的不确定度亦有较大的影响。实验采取的气溶胶光学厚度测量仪器为美国 SolarLight 公司生产的 Microtop II 手持型太阳光度，其测量的光学厚度不确定度 $\frac{\Delta\tau}{\tau} = 0.04$ ，即其不确定度为 4%，经过辐射传输计算可得其对定标结果不确定度贡献不超过 1.5%。

经分析认为，在冬季内蒙古乌拉特前旗环境近似于温带大陆内部，在气溶胶类型选择中认为其气溶胶类型更接近于沙漠型。较为干洁的大气中气溶胶主要影响入瞳处的短波辐射，因此，通过比较四种不同气溶胶类型情况下绿光波段接收到的辐射亮度之间差异即可确定因气溶胶类型差异带来的不确定度，如图 11 所示。在计算中可知，城市型与模型所选取的沙漠型之间差异最大，相差最大为 1.12%。因此，可以认定因气溶胶类型选择所带来的不确定度为 1.2%。

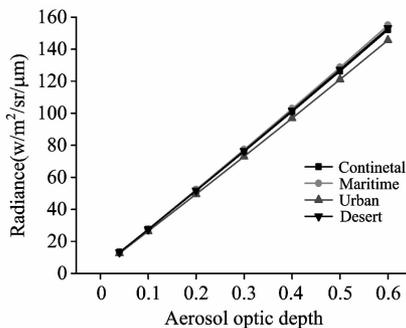


Fig. 11 Error contribution of aerosol type

对绝对辐射定标不确定性的其他影响因素为吸收气体(臭氧和水汽等)和太阳方位角的不确定性。臭氧含量数据来自于 NASA OMI 卫星测量，其误差约为 2%；水汽含量来自气象数据，一般认为其误差不高于 1.5%。依据国内研究结果，认为在此范围内吸收气体对定标结果的不确定性贡献约为 2.12%。太阳方位角的不确定度是通过天文儒历计算而得，其误差约为 0.2%。

总不确定度及各误差源贡献如表 3 所示。

Table 3 Error contribution of absolute radiometric calibration

误差源	测量误差/%	总误差贡献/%
气溶胶厚度测量	4	1.5
气溶胶类型选择		2
吸收气体(O ₃ 及水汽含量)		2.12
6S 模型固有精度	2	2
地面反射率测量		3.49
参考板定标	2	
测量误差	1	
参考板放置水平	1.8	
靶标非朗伯性	2	
太阳天顶角不确定性		0.2
总误差		5.19

表中第一列为误差源，每二列为每个误差源所带来的误差，而第三列表示每项误差在整个辐射定标中的误差贡献。由于定标的总不确定度由参与定标中各误差源贡献的平方和的根表示，计算可得定标过程中的不确定度为 5.19%，优于设计方案中的 6%。

5 结论

本文以 2010 年 11 月 14 日无人机载荷验证场同步测量数据为基础，利用地面铺设的朗伯性较好的高光谱辐射特性靶标，对搭载在无人机上的宽视场多光谱相机进行场地绝对辐射定标。根据研究成果，可以得出以下结论：

(1) 利用验证场配备的高光谱性能辐射靶标进行无人机宽视场多光谱相机进行绝对辐射定标结果良好，其绝对定标不确定度为 5.19%；

(2) 经过辐射定标结果显示各波段辐射结果线性关系非常高，可用以检验传感器线性响应性能；

(3) 实际计算中发现，对地面靶标反射率测量的不确定度对总不确定度贡献最大，约为 3.49%。地表反射率测量中因靶标非朗伯性、参考板标定及参考板的放置都有相对较大的影响。

(4) 气溶胶等大气参数的确定也对定标结果影响较大，本文仅讨论气溶胶光学厚度不确定度的影响。由于飞行当日气溶胶影响较小，且仪器限制，无法对气溶胶复折射系数等参数进行评估。

在传感器场地绝对辐射定标中，提高定标结果可靠性，降低不确定度的关键在于如何提高地面反射率的测量及大气参数的确定。实际测量中因控制测量过程的时间及仪器参数的限制可能使得测量结果的不确定度并非十分理想，但随着测量仪器的发展及测量水平的提高，相信未来测量过程中地表反射率及大气参数的测量计算会更加精确，从而进一步增加场地绝对辐射定标的可靠性。

References

- [1] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, et al. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11.
- [2] Chander G, Markham B L, Helder D L. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893.
- [3] GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, et al(高海亮, 顾行发, 余 涛, 等). *Remote Sensing Review(遥感信息)*, 2010, 4: 117.
- [4] GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, et al(高海亮, 顾行发, 余 涛, 等). *Science China Technological Sciences(中国科学: 技术科学)*, 2010, 40(11): 1312.
- [5] ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-guo, et al(张 勇, 李 元, 戎志国, 等). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2009, 28(3): 188.
- [6] Markham B L, Thome K J, Barsi J A, et al. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2810.
- [7] Rondeaux G, Steven M D, Clark J A, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(14): 2775.
- [8] ZHANG Yu-xiang, ZHANG Guang-shun, HUANG Yi-fen, et al(张玉香, 张广顺, 黄意芬, 等). *Acta Meteorologica Sinica(气象学报)*, 2002, 60(6): 740.
- [9] Gu X F, Guyot G, Verbrugge M. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(14): 2531.
- [10] Dingirard M, Slater P N. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3): 194.
- [11] FU Qiao-yan, MIN Xiang-jun, LI Xing-chao, et al(傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2006, 10(4): 433.
- [12] Biggar S F, Slater P N, Gellman D I. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 245.
- [13] Zhang Y, Gu X F, Tao Y, et al. *Science in China Series E-Engineering & Materials Science*, 2005, 48: 72.

In-Flight Absolute Radiometric Calibration of UAV Multispectral Sensor

CHEN Wei^{1, 2, 3}, YAN Lei^{1, 2, 3*}, GOU Zhi-yang^{1, 2, 3}, ZHAO Hong-ying^{1, 2, 3}, LIU Da-ping^{1, 2, 3}, DUAN Yi-ni^{1, 2, 3}

1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of RS & GIS, Peking University, Beijing 100871, China

3. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration & Its Applications, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Based on the data of the scientific experiment in Urad Front Banner for UAV Remote Sensing Load Calibration Field project, with the help of 6 hyperspectral radiometric targets with good Lambertian property, the wide-view multispectral camera in UAV was calibrated adopting reflectance-based method. The result reveals that for green, red and infrared channel, whose images were successfully captured, the linear correlation coefficients between the DN and radiance are all larger than 99%. In final analysis, the comprehensive error is no more than 6%. The calibration results demonstrate that the hyperspectral targets equipped by the calibration field are well suitable for air-borne multispectral load in-flight calibration. The calibration result is reliable and could be used in the retrieval of geophysical parameters.

Keywords Radiometric calibration; Reflectance-based method; Apparent radiance; Radiometric target

(Received Mar. 3, 2011; accepted Feb. 25, 2012)

* Corresponding author