

文章编号: 1007-4619(2006)05-0636-08

考虑地物 BRDF 特性改进后的 CBERS-02 卫星 CCD 相机的辐射定标系数

李小英^{1,2}, 顾行发^{1,2,3}, 余 涛^{1,2}, 李小文^{1,3,4}

(1. 遥感科学国家重点实验室 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101;
3. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054; 4. 遥感科学国家重点实验室 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要: 在 MODIS 数据对 CBERS-02 卫星 CCD 相机的交叉辐射定标、获得 CCD 相机时间系列的辐射定标斜率系数与截距基础上, 本文考虑地物 BRDF 特性的影响, 开展了提高 CCD 相机数据定量化应用的辐射定标数据精度的研究, 并提供了比较全的时间系列辐射定标系数。

关键词: CBERS-02; CCD 相机; 交叉辐射定标; BRDF

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A

Enhanced Radiometric Calibration Coefficients for CCD Camera by Considering BRDF of Calibration Sites

LIXiao-ying^{1,2}, GUXing-fa^{1,2,3}, YUTao^{1,2}, LIXiao-wen^{1,3,4}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University Beijing 100101, China;

2. The Center for National Spaceborne Demonstration Beijing 100101, China;

3. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China;

4. State Key Laboratory of Remote Sensing Sciences Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences Beijing 100875, China)

Abstract In our previous study radiometric cross-calibration for CCD camera using MODIS data and they gave the radiometric coefficients and offsets were given. However, the calibration precision of those calibration coefficients is not so good, since the BRDF of the calibration sites was not considered. What's more, the calibration coefficients for time series of CCD data are limited because calibrations were performed for the pairs of images of which the viewing zeniths of the MODIS are smaller than 30° . The effort of the article is to enhance the calibration precision of calibration coefficients for CCD data by considering the BRDF of the calibration sites. And more complete calibration coefficients for time series of CCD data are intended to be provided.

Key words CBERS-02; CCD camera; cross-radiometric calibration; BRDF

1 引 言

文献 [1] 以 2004 年 8 月 19 日敦煌景图像为基

础, 利用 MODIS 图像对 CBERS-02 卫星 CCD 相机进行交叉辐射定标, 得到了 CCD 相机的辐射定标斜率系数与截距。由于 MODIS 过境时的观测角小于 30° , 作者在文中没有考虑地物 BRDF 特性对交叉辐

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 李小英 (1975—), 女, 2002 年毕业于北京师范大学资源与环境系, 获理学硕士学位。2006 年 1 月毕业于中国科学院遥感应用研究所, 获理学博士学位。研究方向为定量遥感, 主要研究兴趣是可见光、近红外传感器辐射特性分析。

射定标带来的影响。也由于不考虑地物的 BRDF特性,在确定 CCD相机其他时间系列的辐射定标系数时,只对 MODIS过境观测角小于 30°的图像对进行交叉辐射定标。然而 CCD相机与 MODIS过敦煌的图像对中,MODIS观测角大于 30°的情况较多,这就使得所提供的辐射定标系数数量不多。本文的目的是在对地物 BRDF特性进行修正的基础上,再以文献 [1]中的方法进行交叉辐射定标,尽量降低地物 BRDF特性对辐射定标系数的影响,以进一步提高辐射定标系数的精度。并且在原来所提供的时间系列系数基础上,增加其他时期的辐射定标系数,尽量做到只要 CCD相机获取到高质量的敦煌图像,就可提供相应的辐射定标系数,为 CCD相机的定量化应用提供来源长期稳定且高精度的辐射定标系数。

2 CCD与MODIS交叉辐射定标

2.1 交叉辐射定标公式

CCD和MODIS的TOA辐亮度与表观反射率交叉辐射定标公式如式(1)和(2)。具体的公式推导详见文献[1]和[2]。

$$DC_{ci} = \frac{\rho_{ci}}{\rho_{mi}} \cdot \frac{E_{esi} \cdot \cos\theta_c}{\pi \cdot d^2} \cdot \frac{1}{c_{mi}} \cdot DC_{mi} \cdot a_{ci} + DC_{\Delta_i} \quad (1)$$

$$DC_{ci} = \frac{\rho_{ci}}{\rho_{mi}} \cdot \frac{1}{c_{mi}} \cdot DC_{mi} \cdot c_{ci} + DC_{\Delta_i} \quad (2)$$

式中, a_{ci} , c_{ci} 是 CCD第 i 通道的 TOA 辐亮度及 TOA 反射率的增益; DC_{ci} 是通道 i 的数字计数值; DC_{Δ_i} 是通道 i 的数字计数值的偏移量; E_{esi} 是日地平均距离处的等效太阳辐照度, d 是真实的日地距离和日地平均距离的比值; θ_c 为 CCD过顶时太阳天顶角; $\frac{E_{esi} \cdot \cos\theta_c}{\pi \cdot d^2}$ 是卫星过顶时太阳辐照度的匹配因子,可以较准确地计算获得; $c_{mi} = \cos\theta_m / m_r$ 是 MODIS对应于 CCD第 i 通道的 TOA 反射率的定标系数; θ_m 是 MODIS过顶时的太阳天顶角; m_r 是 MODIS数据文件提供的反射率转换因子; DC_{mi} 是 MODIS图像上的计数值; $\frac{\rho_{ci}}{\rho_{mi}}$ 是两个传感器对应通道的光谱匹配因子,它是 CCD通道 TOA 反射率与 MODIS通道 TOA 反射率的比值,包括了两个传感器对地物和大气不同响应以及不同观测几何大气路径的匹配。

2.2 定标点的选择

匀区作为定标点:敦煌定标场的暗砾砂地、定标场西北角的灰砾砂地、农作物及图像东北角的亮砂地(图 1)。由于同类地物的光谱匹配因子相对稳定,定标点中缺少同步地面测量数据的采用其他来源的同类地物光谱。8月19日的敦煌定标场暗砾砂地和灰砾砂地的光谱匹配因子采用8月25日敦煌场暗砾砂地的测量光谱模拟;亮砂地的光谱匹配因子采用当天测量但不同地点的亮砂地光谱模拟;敦煌主要的农作物为低短棉花,因此农作物的光谱匹配因子用2004年8月2日在新疆多次测量的棉花光谱来模拟。8月19日 CCD与MODIS的过顶时间相差很小,不到 14min,可以认为地表及大气状况没有发生变化。处理地表测量数据时根据白板的 BRF及测量时间的太阳天顶角,修正了白板的 BRF,并比较了白板修正前后 CCD与MODIS通道地表及 TOA 反射率的比值,结果说明白板是否经过 BRF修正对光谱匹配因子基本上没有影响。8月19日 CCD与MODIS的观测几何差别较大(见表1)。从表中可看出,MODIS以 25.84°的观测天顶角过敦煌时,对地物的 BRDF特性会有影响。为了提高定标精度,需要考虑定标点地物的 BRDF特性。

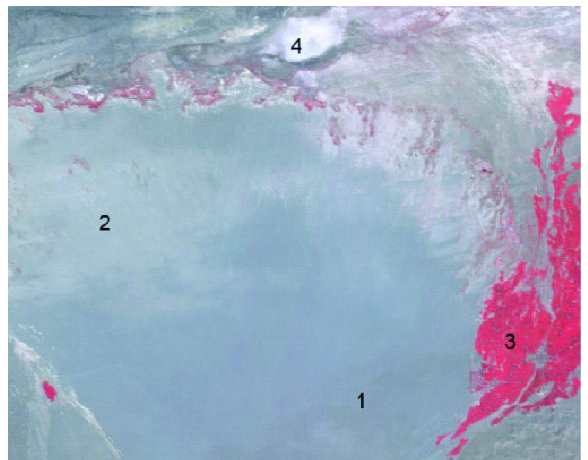


图 1 2004年8月19日敦煌图像上的定标点
(1.暗砾砂地;2.灰砾砂地;3.农作物;4.亮砂地)

Fig 1 The calibration sites of Duhuang image on August 19, 2004

(1. dark gravel sands 2. gray gravel sands
3. crops 4. bright sandy bare land)

2.3 定标点 BRDF对光谱匹配因子的影响

2.3.1 敦煌场暗砾砂地 BRDF的计算

2000年国家气象局在敦煌场的实验中,测量了一组暗砾砂地在太阳主平面下各个观测角(-50°

表 1 2004 年 8 月 19 日 CCD 相机与 MODIS 过敦煌实验场的参数

Table 1 The passing parameters over Duhuang for CCD and MODIS on August 19, 2004

	观测天顶角	观测方位角	太阳天顶角	太阳方位角	过顶时间
CCD	-6.8°	284.126°	31.754°	144.8569°	12.63
MODIS	25.84	99.41	32.7	141.20	12.4

+50°)的反射率,并将其归一化得到近太阳主平面的 BRDF 修正因子。论文中采用核驱动模型来模拟得到 8 月 19 日 MODIS 观测几何下暗砾砂地的 BRDF。核驱动模型可用公式 (3) 表示^[3]。该模型用有一定物理意义的核的线性组合来拟合地表的二向性反射特征。

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{iso} + f_{geo} k_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{vol} k_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (3)$$

式中, R 为二向反射率, k_{geo} 为几何光学核, k_{vol} 为体散射核, 都是光线入射角和观察角的函数; θ_i 为光线入射天顶角; θ_v 为观测天顶角; φ 为太阳与传感器的相对方位角; f_{iso} 、 f_{geo} 和 f_{vol} 则分别表示各向均匀散射、几何光学散射、体散射这三部分所占的比例。文中的 k_{vol} 采用 RossThick 体散射核, k_{geo} 则采用李小文等提出的 LiTransit 几何光学核^[4]。基于 2004 年 8 月 25 日敦煌场的 ASD 光谱及 2000 年一组实测的归一化 BRDF 修正数据, 根据公式 (3) 反演出系数 f_{iso} 、 f_{geo} 、 f_{vol} , 然后通过核的外推可求出 8 月 19 日 MODIS 观测条件下敦煌场地的二向反射。敦煌场地垂直观测及在 25.84° 观测天顶角 99.41° 观测方位角条件下的地表反射率见图 2(a) 与表 2 所示。表 2 说明由于敦煌场地组成成分主要是粗的砾砂, 对地物的 BRDF 特性影响很大, 当观测角约 26° 时, MODIS 各波段的反射率修正前后的差异达到 8%—10%。如果不考虑该影响, 将给 CCD 与 MODIS 的光谱匹配因子的计算带来较大的误差, 直接影响辐射定标结果的精度。

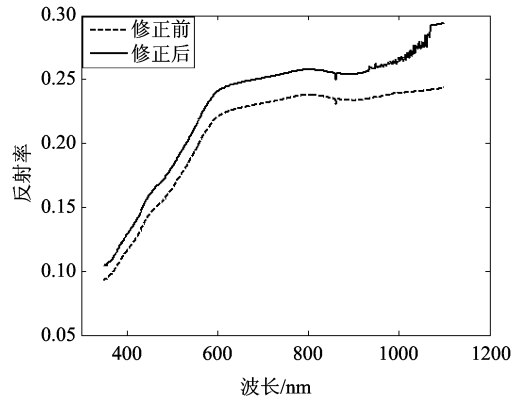
表 2 暗砾砂地的 BRDF 修正

Table 2 BRDF correction for dark gravel sands

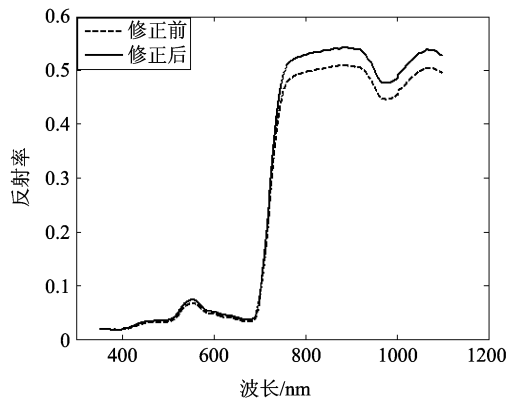
	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
修正前	0.15103	0.19635	0.22707	0.23497
修正后	0.1666	0.21499	0.24697	0.25487
差异 / %	9.8039	9.0631	8.3959	8.1251

2.3.2 敦煌棉花地 BRDF 的模拟

虽然在敦煌棉花地中没有任何地面测量数据, 但由于敦煌的气候与新疆类似, 且 7 月及 8 月的作



(a)



(b)

图 2 地物 BRDF 修正

(a) 暗砾砂地; (b) 低矮棉花地

Fig 2 BRDF correction

(a) dark gravel sands (b) low cottons

物都以低矮棉花为主, 因此利用 2004 年 7 月底及 8 月初初在新疆的实测数据来模拟。7 月底, 在新疆的实验中不仅测量了地物光谱且测量了棉花株的结构参数及土壤参数。以这些实测数据为基础, 采用 Sail 模型^[5]模拟出 8 月 19 日 MODIS 过敦煌时的太阳照明几何下垂直观测及 MODIS 观测几何条件下的棉花地的 BRDF。然后计算 MODIS 观测几何条件下相对于垂直观测的 BRDF 修正因子。并将修正因子作用于 8 月初多次垂直观测下棉花地的 ASD 光谱仪采样光谱均值, 从而得到用于模拟 8 月 19 日 MODIS 过敦煌观测几何条件下棉花地二向反射率

光谱,如图 2(b)与表 3 所示。表 3 也说明 8 月 19 日 MODIS 过敦煌观测几何条件下,对低短棉花地的 BRDF 影响也很大,各波段都在 6% 以上,最大的影响约达 9.6%。

表 3 低短棉花地的 BRDF 修正

Table 3 BRDF correction for low cottons

	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
修正前	0.031607	0.066378	0.037246	0.50483
修正后	0.034512	0.072808	0.041011	0.53758
差异 /%	8.7872	9.2394	9.6221	6.2835

2.3.3 亮砂地 BRDF 的估算

在以往测量及敦煌场地实验中没有获取相应的砂地结构参数,利用 BRDF 模型模拟很难实现。因此,采用前两天 8 月 17 日 MODIS 过敦煌近似垂直观测(观测天顶角为 4° ,方位角为 109°)的图像,估算 8 月 19 日 MODIS 观测几何下定标点的 BRDF 修正因子。8 月 17 日 MODIS 过敦煌的时间为 12:37,与 8 月 19 日相差 13min;太阳天顶角与方位角分别为 30.73° 及 145.40° ,与 8 月 19 日相差较小。可近似看成在同样环境下不同 MODIS 观测角的地表反射率。基于 MODIS 数据处理软件 RSISv1.0^[6] 进行 MODIS 第 1, 2, 3 和 4 波段的几何与大气纠正,并反演出这两次不同观测几何下的亮砂地定标点的地表反射率。将 8 月 19 日反演的 4 个通道地表反射率与 8 月 17 日的地表反射率比值作为亮砂地的 BRDF 修正因子。最后将用于模拟光谱匹配因子的亮砂地测量光谱与 MODIS 光谱响应函数积分,得到 MODIS 各通道反射率,乘以该 BRDF 修正因子,即得到 MODIS 当天观测条件下 4 个通道亮砂地的二向反射率(表 4)。亮砂地 BRDF 的影响在这些地物中相对较小,各波段在 1%—5% 左右。

图 2 与表 2、表 3、表 4 都说明在 8 月 19 日

表 4 亮砂地的 BRDF 修正

Table 4 BRDF correction for bright sandy bare land

	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
修正前	0.2598	0.35152	0.42612	0.45519
修正后	0.2631	0.3697	0.4459	0.4731
差异 /%	1.2622	5.0415	4.5366	3.8587

MODIS 过敦煌的观测条件下,各定标点地物的 BRDF 特性都很明显,如果不进行地物的 BRDF 修正,将影响 CCD 与 MODIS 的光谱匹配因子,直接给定标结果带来相当大的误差。

2.4 结果及不确定性分析

本文在上述地物 BRDF 修正的基础上,计算出图 1 中各辐射定标点 CCD 相机与 MODIS 各波段的光谱匹配因子,如图 3 所示。采用 4 个定标点法进行线性拟合,把 CCD 及 MODIS 对应通道上的平均 DN 值,以及对应地物的光谱匹配因子代入定标公式(1)和(2)进行线性拟合,即可求出 CCD 的辐亮度及反射率的定标系数与数字计数值的偏移量(表 5,图 4)。

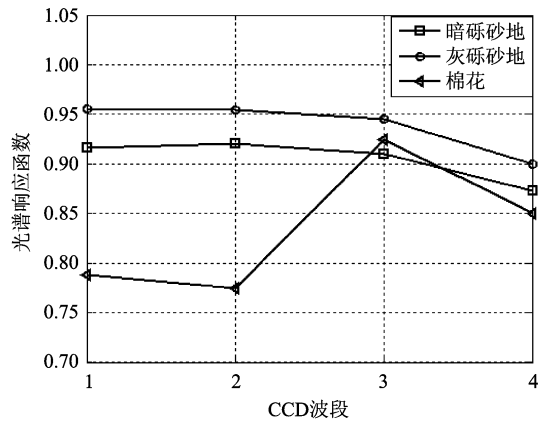


图 3 8 月 19 日 CCD 与 MODIS 各对应通道光谱匹配因子

Fig 3 Spectral band matching factors for CCD and MODIS corresponding bands on August 19, 2004

表 5 CCD 与 MODIS 交叉定标系数与计数值偏移量

Table 5 Radiometric cross calibration coefficients and offsets for CCD

	不考虑地物 BRDF 影响的定标系数				考虑地物 BRDF 影响的定标系数			
	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4
a_{ei}	0.894	1.374	0.838	1.742	0.892	1.353	0.861	1.696
c_{ei}	459.364	649.393	343.584	486.052	458.361	639.659	353.302	473.216
DC_{ei}	1094.83	2003.13	1033.07	1470.11	1093.81	1999.17	1032.07	1467.06

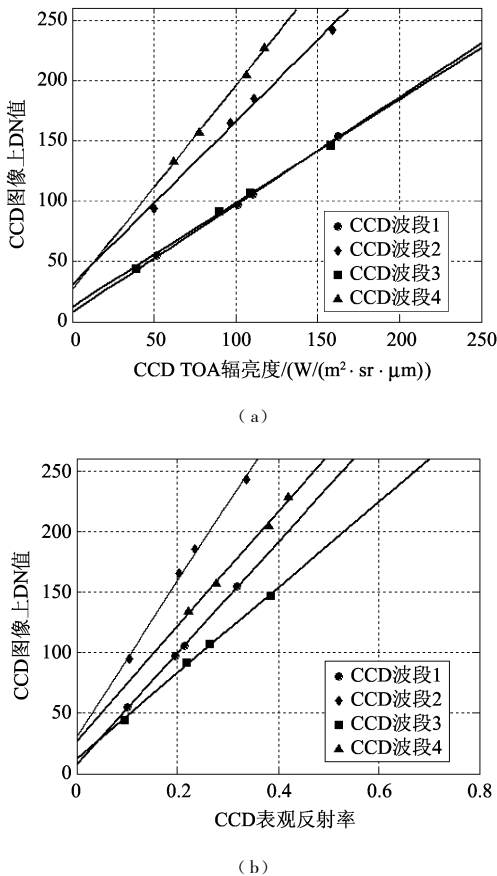


图 4 8月19日 CCD辐亮度 (a)及反射率 (b)交叉定标的定标结果

Fig 4 (a) Radiance and (b) reflectance calibration results for CCD on August 19, 2004

表 5 显示地物的 BRDF 特性修正前后的辐射定标系数有所差异, 因为没有考虑地物 BRDF 因子, 所获得的辐射定标系数比修正地物 BRDF 后的辐射定标系数组合值偏低。

交叉定标的精度是以参考传感器的定标精度为基础的, MODIS 定标系数的不确定性在 $\pm 2\%$ 左右, 因此利用 MODIS 对 CCD 交叉定标, 定标系数起始的不确定性为 $\pm 2\%$ 。其他的不确定性主要包括几何配准的残余误差、CCD 与 MODIS 过顶时刻大气条件及地表的变化、地物非朗伯性及光谱匹配因子的误差。CCD 及 MODIS 的配准误差在 1–2m 之间, 加上 8 月 19 日敦煌景图像 4 个定标点地表较均匀且取它们 DN 值的均值, 其残余误差估计在 1% 左右。8 月 19 日 CCD 及 MODIS 过顶时间相差约 13m in, 忽略地表及大气的变化。交叉定标中最大的误差源是光谱匹配因子, 它包含了传感器光谱响应差异、大气路径及地物 BRDF 的修正。利用其他来

源地物光谱代替定标点同步测量数据计算匹配因子会带来一定误差。但是如前面分析, 同类地物的光谱匹配因子不确定性在 3% 左右。本文所用的光谱有的来自于同步测量数据, 利用其他来源光谱时选择与交叉定标的时间、地区特性相似的同种地物光谱, 其平均不确定性在 2%–3% 之间。照明条件与大气路径不确定性对光谱匹配因子的影响主要是 MODTRAN 模拟的误差, 估计约为 1.5%。8 月 19 日 CCD 相机以观测天顶角 6° 侧摆过境, 文中忽略 CCD 观测角度下 4 个定标点的 BRDF 特性。一般情况下, 地物的 BRDF 特性呈碗状, 在观测角小的情况下 BRDF 特性不明显, 估计平均误差在 1%–2% 左右。文中对根据 MODIS 的观测几何对敦煌场 4 种定标地物进行了 BRDF 修正, 主要是根据实测数据、BRDF 模型及反演的 MODIS 地表反射率进行修正, 估计平均误差在 2% 左右。将所有误差平方和的方根作为总的误差, 2004 年 8 月 19 日基于敦煌景图像利用 MODIS 对 CCD 交叉定标的总的不确定性在 $\pm 5\%$ 左右。

2.5 地物 BRDF 修正前后定标结果比较与真实性检验

利用 8 月 25 日敦煌定标场同步测量的地表光谱数据对地物 BRDF 修正前后的辐射定标结果进行比较分析。基于暗砾砂地同步的测量数据, 用 MODTRAN 模拟得到 TOA 反射率 R_1 ; 分别采用地物 BRDF 修正前后的辐射定标系数计算的同一区域的 TOA 反射率 R_2 (修正后) 与 R_3 (修正前)。分别对这三对结果进行比较, 结果见表 6。从表 6 可见, 经过地物 BRDF 修正后的交叉定标系数得到的表观反射率与测量数据模拟出来的表观反射率 4 个波段的相对差异分别为 4.449%, 2.871%, 0.672% 及 2.708%; 而 BRDF 修正前定标系数得到的表观反射率与模拟结果分别相差 2.605%, -3.476%, -5.048% 与 -4.328%。除了第 1 波段, 地物 BRDF 修正后的定标系数获得的表观反射率的精度要高于 BRDF 修正前的结果, 说明地物 BRDF 修正后的辐射定标系数的精度相对于 BRDF 修正前有所提高。表 6 显示了地物 BRDF 修正前后的定标系数获得的表观反射率各波段相差较大, 分别为 -2.051%, -6.346%, -5.495% 与 -7.124%。由于 MODIS 过境时观测角为 26° 左右, 经过地物 BRDF 修正后, 各通道的反射率要高于修正前的反射率, 相应的 TOA 反射率也高, 也就使得各波段 CCD 与 MODIS

表 6 2004年 8月 25日定标后反射率与模拟的表现反射率比较

Table 6 Comparison for TOA reflectance from simulation and from calibration coefficients on August 25, 2004

	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
DN 值	96.66	162.83	91.08	132.25
模拟得到 TOA 反射率 R_1	0.202	0.212	0.224	0.228
地物 BRDF 修正后定标系数得到的 TOA 反射率 R_2	0.193	0.206	0.223	0.222
地物 BRDF 修正前定标系数得到的 TOA 反射率 R_3	0.1970	0.2195	0.2356	0.2384
$(R_1 - R_2) / [(R_1 + R_2) / 2] \times 100\%$	4.449	2.871	0.672	2.708
$(R_1 - R_3) / [(R_1 + R_3) / 2] \times 100\%$	2.605	-3.476	-5.048	-4.328
$(R_2 - R_3) / [(R_2 + R_3) / 2] \times 100\%$	-2.051	-6.346	-5.495	-7.124

的光谱匹配因子降低,相应的 CCD 各波段的辐射定标系数数值增高,从而使得最终的各波段表现反射率小于地物 BRDF 修正前的结果。

MODIS 过敦煌的图像对进行辐射定标,以分析 CCD 相机辐射响应随时间的变化。所用图像对的日期及它们的观测几何见表 3 和表 7 (2004 年 8 月 19 日除外)。由于 2004 年 7 月 1 日 MODIS 图像上的敦煌场位置在角落上且没包括整个敦煌场,故用前一天 6 月 30 日的 MODIS 图像来替代。从图像上分析及利用辐射组开发的 MODIS 处理软件提取气溶胶所作的比较说明,7 月 1 日与 6 月 30 日 MODIS 过顶时的大气条件基本上一致。

3 CCD 相机辐射响应变化分析

采用上述的 CCD 与 MODIS 交叉辐射定标法,根据 MODIS 过境时的观测几何对地物进行 BRDF 修正,基于 2004 年 4 月—2005 年 5 月 CCD 与

表 7 CCD 与 MODIS 图像对的观测几何

Table 7 Viewing geometries for CCD and MODIS image pairs

日期	传感器	观测天顶角 / (°)	观测方位角 / (°)	太阳天顶角 / (°)	太阳方位角 / (°)	过顶时间
2004-04-14	CCD	0	0	34.29	148.522	12:35
	MODIS	42.83	-74.85	31.65	163.65	13:08
2004-05-10	CCD	0	0	26.556	142.921	12:35
	MODIS	49.65	96.03	30.03	131.86	12:06
2004-06-05	CCD	0	0	22.73	135.52	12:35
	MODIS	6.3	-84.64	21.43	141.05	12:44
2004-07-01	CCD	0	0	22.96	132.55	12:34
2004-06-30	MODIS	5.45	101.27	22.44	134.27	12:38
2004-12-04	CCD	0	0	63.92	164.78	12:35
	MODIS	49.96	95.76	65.72	157.82	12:06
2005-02-20	CCD	0	0	54.54	154.7	12:34
	MODIS	36.39	98.15	55.96	150.46	12:18
2005-05-09	CCD	0	0	26.94	142.88	12:33
	MODIS	16.50	99.64	27.16	142.25	12:30
2005-06-04	CCD	0	0	22.94	135.39	12:33

同样,假设 CCD 相机的偏移量是稳定的,在辐射定标之前,将 CCD 每景图像 DN 值扣除 2004 年 8 月 19 日 CCD 相机交叉定标获得的各波段偏移量。因此只要用一个点就可算出定标系数,这里采用敦煌暗砾砂地来进行交叉辐射定标。从表 7 中可以看到,同一天 MODIS 过顶时的观测天顶角都较大,在计算每对图像 CCD 与 MODIS 的光谱匹配因子前,对敦煌场暗砾砂地的光谱进行 BRDF 修正,修正的方法如前面所述。这些图像对中 CCD 与 MODIS 图像获取时间最大相差不到 30 min,忽略地表及大气的变化,交叉辐射定标的优点在于它不需要精确的大气测量参数,特别是敦煌场暗砾砂地,其光谱匹配因子基本上不随气溶胶的变化而变化,故利用 MODTRAN 4 模拟时采用敦煌场经验大气气溶胶光学厚度,即 0.15m^{-1} 。各图像对的交叉定标结果(包括 2004 年 8 月 19 日)如表 8 及图 5 所示。

表 8 CCD 相机不同日期的辐射定标系数

Table 8 Radiometric calibration coefficients for

CCD on different dates

	蓝波段	绿波段	红波段	近红外波段
2004-04-14	1.0299	1.542	0.9632	1.917
2004-05-10	/	1.5401	0.93039	1.8875
2004-06-05	1.0168	1.505	0.90611	1.8494
2004-07-01	0.96006	1.467	0.91568	1.8351
2004-08-19	0.8924	1.3531	0.8606	1.6955
2004-12-04	0.85017	1.1027	0.72823	1.2679
2005-02-20	0.86028	1.1764	0.79818	1.5138
2005-05-09	0.94476	1.4382	0.92475	1.8295
2005-06-04	0.95235	1.4522	0.93099	1.8385

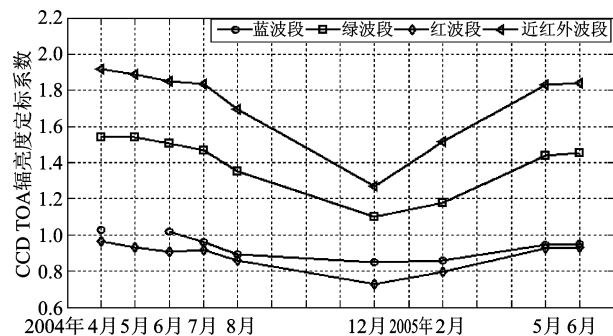


图 5 CCD 相机辐射响应随时间的变化

Fig 5 Radiometric respond of CCD changing with time

从表 8 与图 5 可以看出, CCD 相机 4 个波段的辐射响应随时间而发生变化。CCD 相机的 4 个波段的辐射响应从 2004 年 4 月到 2004 年 12 月基本上呈衰减趋势。但各个波段的衰减速度有所差异,第 1 波段在这期间衰减较缓慢。但 CCD 的辐射响应在 2005 年 2 月开始回升,而在 2005 年 5 月与 6 月基本上与 2004 年 6 月的系数差不多。2005 年 2 月 20 日得到的系数有小的升高是可以解释的,因为资源卫星中心在 2004 年 12 月对 CCD 图像一级产品(探元相对辐射定标)的生成算法进行了调整,他们的统计表明,调整前后会有 2 个 DN 左右的差别,而这种差别就会造成调整前后定标系数有个突变。但是 2 个 DN 左右的调整不会造成 2005 年 5 月及 6 月定标系数有这么大的升高。目前产生原因还不能确定。据悉,由于卫星能量不足,地面站于 2005 年 4 月份关闭了同一平台上的 IRMSS 传感器,或许与之有关。

4 结 论

本文是在文献 [1] 对 CCD 相机进行交叉辐射定标的基础上,根据 MODIS 过境时观测几何,进一步考虑了地物 BRDF 特性对交叉辐射定标的影响。研究表明,地物 BRDF 特性的影响对文献 [1] 的定标结果影响比较大。地物 BRDF 特性修正前后,辐射定标系数差异较大。检验结果表明,地物 BRDF 修正后的辐射定标系数的精度要高于修正前的精度,各通道计算获得的 TOA 反射率分别相差 -2.051% , -6.346% , -5.495% 与 -7.124% 。因此本文的研究结果进一步提高了 CCD 的辐射定标系数的精度。另外,由于考虑了地物 BRDF 的影响,增加提供了 MODIS 大观测角条件下与 CCD 同步获取敦煌场图像对的辐射定标系数,使得原来的时间系列定标系数不仅精度更高,而且提供了更加连续的辐射定标系数。

参 考 文 献 (References)

- [1] Li X Y, Gu X F, Min X J et al. Radiometric Cross-calibration of the CBERS-02 CCD Camera with the TERRA MODIS [J]. Science in China Ser E Engineering and Materials Science 2005, 48(Supp): 44-60 [李小英, 顾行发, 闵祥军等. 利用 MODIS 对 CBERS-02 卫星 CCD 相机进行辐射交叉定标 [J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(增): 41-58]
- [2] Li X Y. In Flight Radiometric Calibration and Pixel Based Calibration for CCD Camera and WFI Imager on CBERS-02 [D]. Dissertation for PHD [D]. Institute of Remote Sensing

- Applications Chinese Academy of Sciences 2005. [李小英. CBERS-02卫星 CCD相机和 WFI成像仪在轨辐射定标与像元级定标研究[D]. 博士论文,中国科学院遥感应用研究所, 2005.]
- [3] Wanner W, Li X, Strahler A. On the Derivation of Kernels and Kernel-driven Models of Bidirectional Reflectance[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, **100**(D10): 21077-21089.
- [4] Li X W, Gao F, Liu Q, et al. Validation of a New GO Kernel and Inversion of Land Surface Albedo by Kernel-Driven Model[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, **4**(Supp): 1-7. [李小文, 高峰, 刘强等. 新几何光学核的验证以及用核驱动模型反演地表反照率(之一)[J]. 遥感学报, 2000, **4**(增刊): 1-7.]
- [5] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, **16**: 125-141.
- [6] Liu Q H, Chen L F. RSIS Remote Sensing Inversion System [P]. Institute of Remote Sensing Application. CAS. Software Registration Mark: 2003SR10794, 2003. [柳钦火, 陈良富. RSIS遥感反演系统[P]. 中国科学院遥感应用研究所, 软件登记号: 2003SR10794, 2003.]