

光谱响应差异对高精度交叉定标的影响 ——以 FY-3A /MERSI 与 EOS /MODIS 为研究实例

吴荣华^{①②}, 杨军^②, 杨忠东^②, 刘京晶^②

(^①中国气象科学研究院, 北京 100081; ^②国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:分析了 MERSI 与 MODIS 间光谱响应差异对测量表观反射比的影响。正演模拟结果显示, 在极区冰雪情况下, MERSI 与 MODIS 测量得到的表观反射比之间的相对差异是关于 MODIS 所测表观发射比的二次函数。MERSI 的前 4 个通道与对应的 MODIS 通道之间的相对差异在 0~ 0.8%, 0~ 2%, 0.5%~ 2.5%, - 1.8%~ - 0.8% 之间。将正演模拟得到的对光谱响应差异的修正关系应用到具体的 SNO 测量后, MERSI 前 3 个通道的表观反射比与修正后 MODIS 的表观反射比之间的相对差异减小到了 3% 以内。MERSI 的 1、2 通道在红外波段也有响应, 这部分响应在极区冰雪条件下对表观反射率的影响在 0.5% 左右, 基本可以忽略。

关键词: MERSI; MODIS; 光谱响应; 辐射定标

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.010

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0051-07

Impacts of Spectral Response Differences on SNO Calibration study Examples of FY-3A/MERSI and EOS/MODIS

WU Rong hua^{①②}, YANG Jun^②, YANG Zhong dong^②, LIU Jing jing^②

(^①Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081;

^②National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: This paper analyzes the impacts of MERSI and MODIS spectral response differences on the measured apparent reflectance. Simulated result shows that the relative difference between MERSI and MODIS measurements in apparent reflectance is a quadratic function of MODIS apparent. The ranges of the relative difference in the first four bands of MERSI and the corresponding MODIS bands are about 0~ 0.8%, 0~ 2%, 0.5%~ 2.5%, - 1.8%~ 0.8%. Modify functions which are regressed from the forward modeling results are then applied to the SNO measurements, the relative difference between MERSI first 3 bands and relevant MODIS bands reduced to within 3%. For MERSI Band 1 and Band 2, there is a bit of response in Near infrared, the effects of these responses are about 0.5%, which can ignore their impacts in polar condition.

Key words: MERSI; MODIS; spectral response; radiance calibration

1 引言

20 世纪 60 年代初美国发射第一颗气象卫星以来, 航天遥感科学经历了 40 多年的发展, 遥感资料已经广泛地应用于天气、气候、资源探测以及环境监测等诸多领域^[1]。随着应用需求的不断扩展与深入, 对

遥感资料质量的要求不断提高, 遥感资料高精度定量化应用已成为当今诸多领域的关注热点。为了实现高精度定量化遥感, 获得更高质量的对地观测数据, 遥感器的高精度定标已经成为关键技术之一^[2]。

近年发展的同时星下点观测 (Simultaneous Nadir Observation, SNO) 方法^[3], 提高了卫星在轨

收稿日期: 2010-03-09 修订日期: 2010-04-07

基金项目: 本文由国家科技支撑计划, “沙尘暴的长时间序列遥感数据分析系统和产品集成平台建设” (2008BAC40B03) 资助。

作者简介: 吴荣华 (1982~), 男, 硕士研究生, 研究方向: 遥感卫星信息处理技术。

E mail: wuronghuabj@163.com

辐射定标的频次和精度。通过对比参考传感器和待定传感器在同时通过轨道交叉点时的数据,较为理想地实现了对同一目标同时观测的目的,提高了辐射定标精度。由于卫星轨道交叉点比较多,同时通过交叉点的机会很多,因此利用该方法定标大大提高了定标的频次,对于定标系数的跟踪有良好的作用。SNO方法降低了替代定标中的干扰因素,对定标结果影响较大的因素是传感器之间的仪器性能差异,其中通道光谱响应的差异是比较重要的影响因素。Teillet等的研究结果显示光谱响应差异的影响大小对地物的类型很敏感,研究光谱响应对定标结果的影响可以进一步提高定标精度,得到精确性更好的遥感数据^[4]。

我国第二代极轨气象卫星FY-3系列,其首发星FY-3A于2008年5月27日发射升空,目前已完成了在轨测试,投入业务试运行^[5]。其中中分辨率光谱成像仪(MERSI)具有多光谱和高分辨率成像的特点,其独具特色的5个250m通道,可以得到百米量级空间分辨率真彩色合成产品。

目前已利用我国的敦煌辐射场对MERSI进行了外场定标,但是这种方法的费用以及人力投入往往较为高昂,限制了其实际应用的次数。刘京晶等^[6]曾通过外场交叉定标的方法,利用标定好的传感器(EOS/MODIS),对多通道可见光近红外探测仪(FY1D/MVIRS)进行标定。该方法也可以用于对FY-3A/MERSI进行交叉定标。此方法比外场定标花费少,同时能提高定标的频次,但是影响其精度的因素较多,如观测几何、过境时间差异、大气条件差异、地表反射特性等等,不利于误差分析。

交叉轨道同时星下点观测(SNO)方法也应用于对MERSI的定标。由于FY-3A和TERRA都是太阳同步轨道上午卫星,轨道的交叉点很多,可以进行SNO定标将参考传感器(MODIS)的定标系数传递给待定传感器(MERSI),得到较高频次的定标信息。但是目前对光谱响应差异的影响考虑的还不够,需要对其进行具体的研究。本文研究在SNO的情况下,光谱响应差异对上述两传感器实测表现观反射比的影响。

2 方法

2.1 方法原理

MODIS传感器L1B数据的表现反射率计算:

$$\rho \cos\theta_s = a_i(DN - DN_0) \quad (1)$$

其中 ρ 表示大气层顶的表现反射比,下角标*i*表示传感器第*i*个通道, θ_s 为太阳天顶角(其余弦通常记作 μ), a_i 为*i*通道的定标系数, DN 表示星上计数值, DN_0 表示暗背景计数值^[7]。

对传感器入瞳处表现反射比的正演,是利用6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum^[8])模型计算得到的。6S模拟计算的结果为大气层顶表现反射比随波长的变化情况 $\rho^*(\lambda)$ 。

由表现反射比定义:

$$\rho_i^* = \frac{\pi L_i ds^2}{E_{0i} \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

及传感器对辐射量的响应过程:

$$\begin{aligned} L_i &= \int_i L(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \\ &= \int_i \rho^*(\lambda) E_0(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

得到传感器测量的表现反射比:

$$\rho_i^* = \frac{\int_i \rho^*(\lambda) R_i(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda}{\int_i R_i(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

其中 $L(\lambda)$ 表示辐亮度, $E_0(\lambda)$ 表示太阳常数, $R_i(\lambda)$ 为*i*通道的光谱响应函数, ds 表示相对日地距离。

以往的SNO定标对光谱响应差异的影响考虑的不够充分,认为 $\rho_{MERSI}^* \cos\theta_{MERSI} = \rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS}$,即两传感器测出的表现反射比相同。而实际情况是光谱响应存在差异,虽然入瞳处的辐射物理量相同,但是传感器内部对相同辐射量的响应不同,因而需要对等式右边的 $\rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS}$ 进行修正,使

$$\rho_{MERSI}^* \cos\theta_{MERSI} = \rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS} (1 + \Delta) \quad (5)$$

Δ 即反映了光谱响应差异的影响。由上式可知

$$\Delta = \frac{(\rho_{MERSI}^* \cos\theta_{MERSI} - \rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS})}{\rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS}} \quad (6)$$

Δ 表示MERSI的测量值与MODIS差异的百分比。本文通过正演模拟的方法,归纳出 Δ 随 $\rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS}$ 的变化规律。

2.2 正演模拟中的输入参数

由于极轨卫星间在南北极交叉点最多^[9],所以研究极地SNO过程具有实用价值。本文使用6S模型进行正演模拟。正演过程中6S模型的输入参数如表1所示。

表 1 6S 正演模拟输入参数列表

输入参数	参数范围	单位
太阳天顶角	45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80	°
观测天顶角	0	°
相对方位角	30	°
日地距离	1	天文单位
大气廓线	US62	
水汽	0. 724185 0. 627627 0. 531069 0. 48279 0. 434511 0. 337953 0. 241395	g/m ³
臭氧	0. 4345, 0. 4345, 0. 395 0. 395, 0. 395, 0. 3555 0. 3555	atnr cm
气溶胶类型	大陆型	
光学厚度	0. 05, 0. 1, 0. 15, 0. 2, 0. 25	
地表高程	0. 1, 1. 5, 2, 2. 5, 3, 3. 5	km
地表目标物	冰雪	

SNO 定标时, 观测天顶角固定为 0°; 假设地表朗伯, 则相对方位角对模拟没有影响, 这里选用 30°; 水汽取 6S 模型自带的极区水汽的含量并分别按对其 ±50%、±30%、±10% 取值, 臭氧同样参考 6S 模型并分别对其 ±10% 取值。

对于冰雪的反射率曲线, 由于没有实测的极地冰雪反射率曲线, 所以取 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 光谱库中 3 种尺寸的典型模型, 即 24μm、82μm 和 178μm 有效尺寸冰雪颗粒。它们的反射率曲线如图 1 所示。

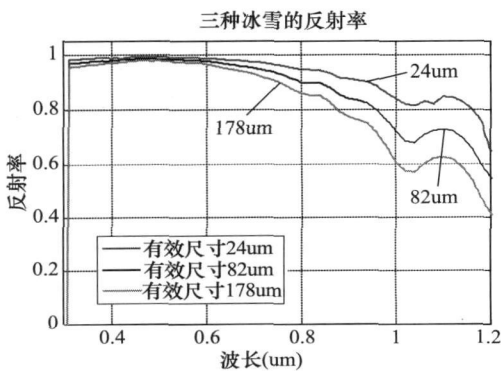
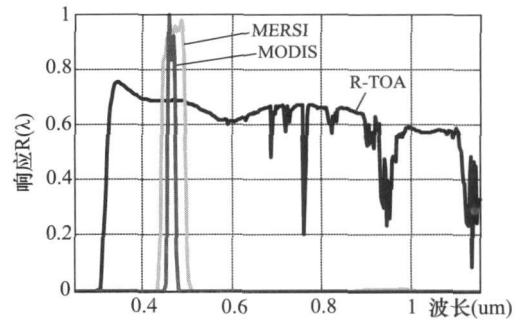


图 1 JPL 光谱库中冰雪的反射率模型

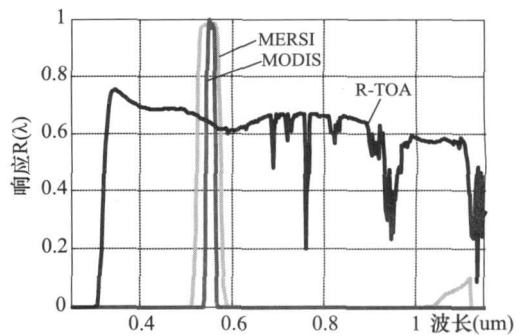
通过正演模拟得到大气层顶的反射率 $\rho^*(\lambda)$ 曲线, 根据公式 (4) 和公式 (6) 计算两遥感器相对应的通道的 Δ , 之后分析 Δ 与 $\rho_{MODIS}^* \cos\theta_{MODIS}$ 的关系。

3 正演模拟结果

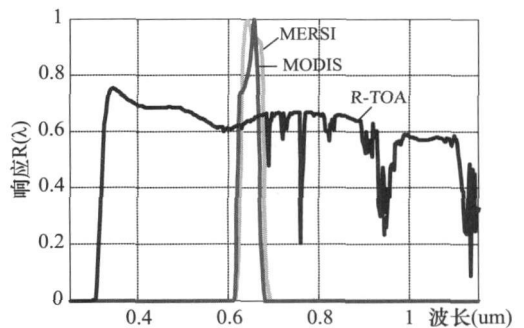
3.1 MERSI 与 MODIS 对应通道光谱响应差异分析



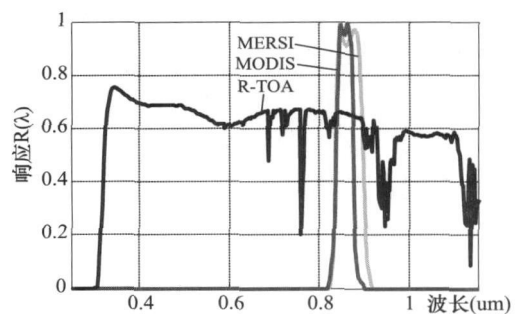
(a) MERSI 1 通道光谱响应函数曲线



(b) MERSI 2 通道光谱响应函数曲线



(c) MERSI 3 通道光谱响应函数曲线



(d) MERSI 4 通道光谱响应函数曲线

图 2 MODIS 与 MERSI 光谱响应函数曲线(1-4 通道)

图 2 各图中横轴表示波长, 以微米 (μm) 为单位, 纵轴范围为 0~ 1, 无量纲。绿色曲线为 MERSI

的光谱响应函数曲线,蓝色曲线为 MODIS 相应的光谱响应函数曲线,黑色曲线为模拟计算的大气层顶表观反射比曲线,这些曲线都是随着波长变化而变化,故组合在一起显示。图 2 各图中,大气顶表观反射比(R-T OA,黑色线)是从模拟结果中选取的一条大气层顶表观反射比曲线(输入条件为表 1 中各个条件的第一种情况)。

图 2(a)中,MERSI1 通道的带宽为 50nm,而对应的 MODIS3 通道的带宽为 20nm,中心波长分别为 470nm、465nm。在通道响应范围内的表观反射比较平缓。需要指出,约在 0.84um~ 1um 的波段,有光谱响应存在。这部分的响应会对 MERSI 通道 1 的测量产生影响,将在本文第四部分做进一步具体研究。

图 2(b)中,MERSI2 通道和 MODIS4 通道中心波长分别为 550nm、555nm,在通道响应范围内表观反射比随波长变小,所以 MERSI 的测量值比 MODIS 所测得数值更大一些。由于 MERSI2 通道在近红外 1.03um~ 1.13um 范围内存在有光谱响应存在,这部分响应在水汽吸收带附近,对应的表观反射

比偏低,从而使研究这一通道变得比较复杂。这部分的响应对 MERSI 通道 2 的测量产生的影响,也将在本文的第四部分具体研究。

图 2(c)中,MERSI3 通道中心波长为 650nm,对应的 MODIS1 通道中心波长为 645nm,两传感器响应曲线覆盖范围基本一致,整体上,MERSI 的中心波长比 MODIS 的更长,带宽基本相同。在通道响应范围内,表观反射比随波长的变大而变高,则 MERSI 测量得到的表观反射比比 MODIS 的要偏高。

图 2(d)中,MERSI 的带宽为 50nm,MODIS 的为 35nm,,通道左边界基本一致,但由于带宽不同,所以右边界不同,这样 MERSI 的中心波长为 865nm,MODIS 为 855nm。在通道响应范围内,表观反射比随波长变小而变小,则 MERSI 的表观反射比应比 MODIS 的略小。

3.2 正演模拟结果分析

将 2.2 节中的参数输入到 6S 后,分析模拟结果,根据公式(6)计算的 Δ 作为纵轴、 $\rho_{i-MODIS}^* \cos \theta_{s-MODIS}$ 作为横轴作图,得到图 3。

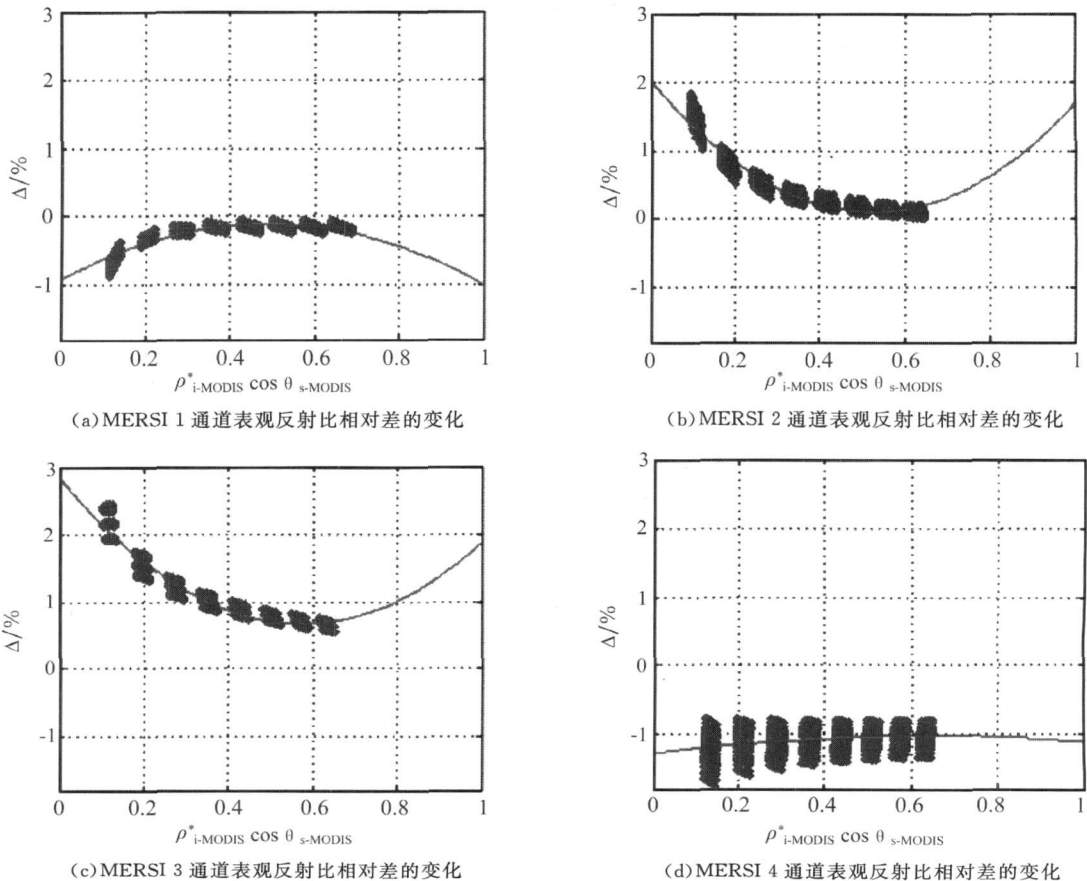


图 3 MERSI 与 MODIS 表观反射比的相对差

通过图 3 可知, 对于 MERSI 1 通道(470nm), MERSI 的反射比比 MODIS 的小 0% ~ 0.8%。对于 MERSI 2 通道(550nm), 模拟结果显示为偏大在 0% ~ 2% 左右。对于 MERSI 3 通道(650nm), MERSI 的表观反射比比 MODIS 的要高一些, 相对差的范围大约在 0.5% ~ 2.5% 之间。对于 MERSI 4 通道(865nm), MERSI 的表观反射比比 MODIS 的偏小, 偏小在 -1.8% ~ -0.8% 之间。

对各通道的模拟值分布进行二次拟合, 得到对光谱响应差异的具体修正关系。具体数量关系如表 2 所示。

表 2 各通道回归出的二次函数的各项系数

MERSI Band1		
	系数	95% 置信区间
A	- 3.409	(- 3.553, - 3.265)
B	3.348	(3.232, 3.464)
C	- 0.934	(- 0.9545, - 0.9135)
MERSI- Band2		
	系数	95% 置信区间
A	6.986	(6.761, 7.211)
B	- 7.323	(- 7.491, - 7.154)
C	2.022	(1.995, 2.049)
MERSI- Band3		
	系数	95% 置信区间
A	6.61	(6.367, 6.853)
B	- 7.548	(- 7.733, - 7.363)
C	2.828	(2.798, 2.859)
MERSI Band4		
	系数	95% 置信区间
A	- 0.6068	(- 0.9551, - 0.2585)
B	0.7855	(0.5095, 1.062)
C	- 1.285	(- 1.333, - 1.236)
A	- 0.6068	(- 0.9551, - 0.2585)

为方便表示, 令 $X = \rho_{MODIS} \cos\theta_{s,MODIS}$, 各个通道回归出的关系为 $\Delta = A \times X^2 + B \times X + C$, 其中各个通道的系数以及 95% 的置信区间如上表所列。

4 实际应用

4.1 SNO 实测数据

收集过境时间尽量接近, 星下点目标为极区晴空下的冰雪, 且观测天顶角在 3° 以内的数据。具体为图 4 中黑框内数据点。

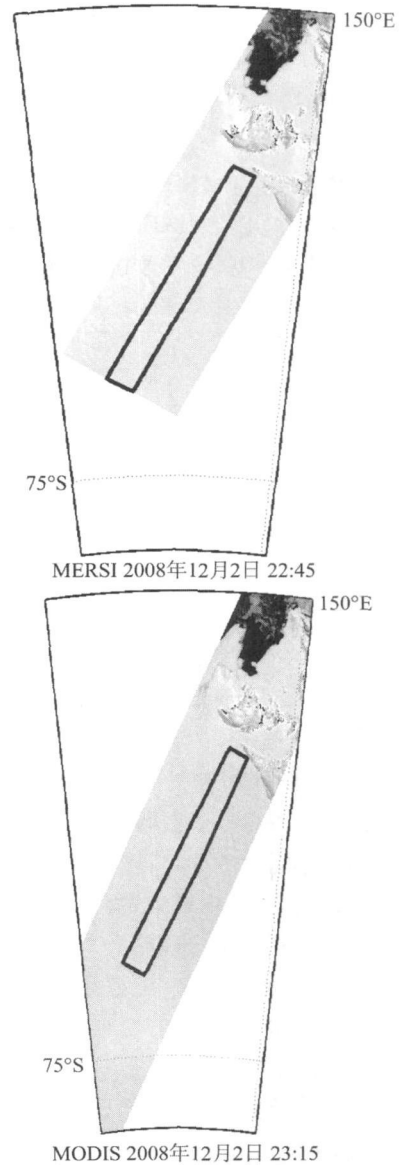


图 4 MERSI 与 MODIS 的 SNO 图像

上图中两遥感器的成像几何如表 3、4 所示:

表 3 MERSI 成像几何参数

MERSI	均值	方差	最大值	最小值
θ_s	57.25	1.14	59.36	55.08
θ_{v_v}	59.85	1.50	63.51	56.94
φ_s	1.19	0.66	2.56	0.14
φ_v	30.54	109.60	179.99	- 179.93

表 4 MODIS 成像几何参数

MODIS	均值	方差	最大值	最小值
θ_s	55.42	1.22	57.64	53.134
θ_{v_v}	52.46	1.57	56.26	49.388
φ_s	1.55	0.97	3.78	0.16
φ_v	- 9.76	78.41	143.33	- 138.22

分别取 MODIS 和 MERSI 图像中黑色矩形框区域内的表观反射比的平均值, 各通道结果如下所

示。相对差为(MERSI 的表观反射比- MODIS 表观反射比)/MODIS 的表观反射比×100%。

假定在同一时刻, FY-3A 在 TERRA 星的位置上测量, 将 MODIS 的每个像元点通过公式 (6) 转换为 MERSI 的表观反射比(MERSI'), 定义相对差=(MERSI' 表观反射比 - MERSI 表观反射比)/MERSI 表观反射比×100%。如表 5 所示。

表 5 遥感器实际测量的表观反射比

2008 年 12 月 02 日				
MERSI	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
$\rho_{F,MERSI}^*$	0.9289	0.9035	0.9032	0.8878
MODIS	Band 3	Band 4	Band 1	Band 2
$\rho_{i,MODIS}^*$	0.9298	0.8843	0.8739	0.8447
相对差/%	-0.09	2.17	3.35	5.1
MERSI'	0.9288	0.8853	0.8803	0.8358
相对差/%	0.01	2.05	2.6	6.22

对于 MERSI 的 1 通道, 两遥感器表观反射比相差很小, 在对光谱响应差异影响修正后, 变化较小。2 通道的相对差在 2.17%, 修正后两遥感器对应通道测量值的差有所减小。3 通道的相对差由 3.35% 减小到 2.6%, 两遥感器的测量结果更加接近。4 通道的差异则由 5.15% 增大到 6.22%, 此通道的实际数据结果与正演模拟的结果不一致, 原因比较复杂, 有待于进一步的研究。总体而言, MODIS 的定标精度在 3% 左右, 在考虑了光谱响应差异的影响后, MERSI 的前 3 个通道与 MODIS 对应的通道间的差异在此精度范围之内。

4.2 近红外谱段的光谱响应分析

MERSI 的第 1、2 通道光谱响应在红外范围内也存在一定的辐射响应, 这部分响应对表观反射比的影响需要进行定量的研究。将此部分的光谱响应全部设置为零, 重新进行正演模拟, 将得到的结果与未对光谱响应处理的正演模拟结果对比, 得到如图 4 所示的结果。

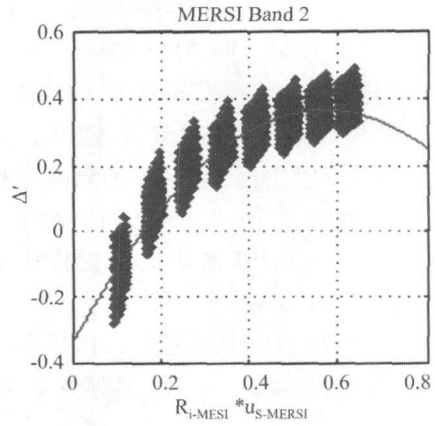


图 4 MERSI 光谱响应处理前后的正演结果对比图

通过上图可以知道, 对于 MERSI 的 1 通道, 光谱响应处理前的结果相对较高, 高出了 0.02% ~ 0.12%, 对于 2 通道, 光谱响应处理前的结果相对于处理后的结果有 -0.2% ~ 0.6% 的变化。对上述通道分别进行二次拟合, 得到如表 6 所示的回归关系。

表 6 回归二次函数的各项系数

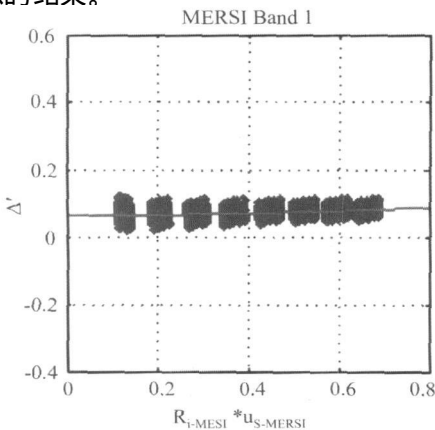
MERSI Band 1		
	系数	95% 置信区间
A	0.03819	(0.005547, 0.07084)
B	-0.00217	(-0.02851, 0.02417)
C	0.06777	(0.06314, 0.0724)
MERSI Band 2		
	系数	95% 置信区间
A	-2.179	(-2.297, -2.062)
B	2.49	(2.402, 2.578)
C	-0.3436	(-0.3578, -0.3293)

利用上述回归关系修正 MERSI 的表观反射比, 得到理想光谱响应的测量值及相对变化如表 7。

表 7 MERSI 光谱响应处理前后表观反射比相对变化

MERSI	ρ_i^*	$\rho_i^{* '}$	相对变化
Band 1	0.9289	0.9299	0.107654
Band 2	0.9035	0.9068	0.365246

表观反射比相对变化都在 0.5% 以内。根据公式 (4), 在计算表观反射比时, 光谱响应函数被太阳常数调制, 红外谱段的太阳常数比可见光谱段太阳常数小很多, 导致红外谱段的响应的影响被压低。因此对于极区冰雪而言, MERSI 的 1、2 通道在红外谱段的响应对 MERSI 测量表观反射比的影响可以忽略。



5 结束语

本文通过 6S 正演模拟, 定量地研究了在相同条件下光谱响应差异引起的两遥感器表观反射比之间的差异。分析了一组两个遥感器对应相同地点观测时间足够相近的实际数据。主要结论如下:

(1) 模拟的结果表明: 对于极区冰雪目标物的条件下, MODIS 与 MERSI 对应通道的光谱响应差异相对于 MODIS 的表观反射比满足二次函数关系。

(2) MERSI 的前 4 个通道测量值与其各自对应的 MODIS 测量值之间的相对差异在 0% ~ 0.8%, 0% ~ 2%, 0.5% ~ 2.5%, -1.8% ~ -0.8% 之间。

(3) 实际数据结果显示, 在考虑了光谱响应差异之后, MERSI 的前 3 个通道与各自 MODIS 对应通道的表观反射比之间相对差异都在 3% 以内。同时需要进一步研究光谱响应差异对 MERSI 的 4 通道与其对应 MODIS 通道的影响。

(4) MERSI 的 1、2 通道在红外谱段的响应的影响很有限, 正演结果显示在 -0.3% ~ 0.5% 以内, 实际数据显示在 0.3% 左右, 基本可以忽略其影响。

上述结论只在本论文限定的极区冰雪条件下成立, 对于其他地区和其他地表观测物, MERSI 和 MODIS 光谱响应差异对测量表观反射比的影响还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 杨忠东, 谷松岩, 邱红, 黄签, 范天锡. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 113- 120.
- [2] 童进军. 遥感卫星综合辐射定标方法研究[D]. 2004.
- [3] Cao Changyong, Heidinger Andrew K., Sullivan Jerry T. Using moderate resolution imaging spectrometer(MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels[J]. Journal of Geophysical Research, 2002(107): X1- X9.
- [4] Teillet P. M., Fedosejevs G., Thome K. J., et al. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross calibration between satellite sensors in the solar reflective spectral domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2007(110): 393- 409.
- [5] ZHANG Peng, YANG Jun, DONG Chao-hua, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009(3): 367- 373.
- [6] LIU J. - J., QIAO Y. - L., LIU Y. - J., et al. A new method for cross calibration of two satellite sensors[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004(25): 5267- 5281.
- [7] Montgomery Harry, QIU Shiyue, Barnes Bob, et al. Draft of the MODIS level 1B algorithm theoretical basic Document Version 2.0[R]. 1997. 2
- [8] Vermote E., Didier Tanrè, Jean Luc Deuze, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997(35): 675- 686.
- [9] Cao C., Weinreb M., H. Xu. Predicting simultaneous nadir overpasses among polar orbiting meteorological satellites for the intersatellite calibration of radiometers[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004(21): 537- 542.

(上接第 8 页)

- [7] Masuda, K. Takashima, T., Takayama, Y. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions[J]. Remote Sensing of Environment, 1988(24): 313- 329.
- [8] Niclòs, R., Valor, E., Caselles, V., Coll, C., Sánchez, J. M. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity—validation of models[J]. Remote Sensing of Environment, 2005(94): 83- 93.
- [9] Saunders, P. M. Shadowing on the ocean and the existence of the horizon[J]. Journal of Geophysical Research, 1967(72): 4643- 4649.
- [10] Segelstein, D. J. The complex refractive index of water[D]. M. S. thesis (University of Missouri, Kansas City, Missouri). 1981.
- [11] Wu, X., Smith, W. L. Sensitivity of sea surface temperature retrieval to sea surface emissivity[J]. ACTA Meteorol. Sinica, 1996(10): 376- 384.
- [12] Wu, X., Smith, W. L. Emissivity of rough sea surface for 8- 13 μm: modeling and verification[J]. Applied Optics, 1997, 36(12): 2609- 2619.