

文章编号: 1001 - 9014 (2009) 05 - 0330 - 05

# FY-3 气象卫星中分辨率光谱成像仪和扫描辐射计 11 $\mu$ m 红外窗区通道的比较

毕研盟, 杨忠东, 陆其峰, 郑照军  
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 在中国新一代气象卫星风云三号搭载的遥感器中, 不同遥感器设有相近的通道. 针对扫描辐射计 (VRR) 第四通道 (波段范围 10.3 ~ 11.3 $\mu$ m) 和中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 第五通道 (中心波长 11.25 $\mu$ m), 应用精确的逐线辐射传输模式 (LBLRTM) 模拟计算了红外波段 8 ~ 14 $\mu$ m 大气顶向外出射的光谱辐射率, 大气廓线采用 ECMWF 再分析产生的具有代表性的全球 52 条大气廓线数据集. 结合上述两个通道的光谱响应函数, 计算了卫星接收到的大气顶出射辐射, 从理论上分析了两个通道观测亮温之间的关系. 应用 2008 年 9 月青海湖辐射校正场 FY-3 实际观测数据, 检验了两个通道的关系. 比较结果表明: LBLRTM 模拟计算得到的 MERSI 和 VRR 两个红外窗区通道的亮温有较好的一致性和线性关系, MERSI 稍低于 VRR, 偏差随温度的升高而线性增加. 实际观测数据受诸多因素的影响, 通道对比结果与理论模拟有一定的差异, VRR 观测亮温低于 MERSI 结合 MODIS 的观测数据, 分别与两个通道的观测结果进行了对比, 确认了 VRR 可能较低地估计了温度, MERSI 与 MODIS 的符合程度在温度探测的绝对精度范围之内. 该研究结果有助于评价 MERSI 和 VRR 两个红外相似通道观测结果的异同性.

**关键词:** 风云三号; 可见和红外扫描辐射计; 中分辨率光谱成像仪; 红外通道; 亮温  
**中图分类号:** TP79: P405 **文献标识码:** A

## COMPARISON OF INFRARED 11 $\mu$ m WINDOW CHANNELS FOR MEDIUM RESOLUTION SPECTRAL IMAGER AND VISIBLE AND INFRARED RADIOMETER ON FY-3 METEOROLOGY SATELLITE

BI Yan-Meng, YANG Zhong-Dong, LU Qi-Feng, ZHENG Zhao-Jun  
(National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The different remote sensors on China new generation meteorology satellite FY-3 have similar thermal infrared channels. For the visible and infrared radiometer (VRR) infrared 4-channel and medium resolution spectral imager (MERSI) infrared 5-channel, the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM), in which the atmospheric profiles adopt global 52 atmospheric profiles generated by ECMWF, was performed to calculate the spectral radiance emitted from the earth-atmosphere between 8 $\mu$ m and 14 $\mu$ m. The radiance received by the satellite was computed combined with the spectral response functions of channels and then the theoretical relationship of the brightness temperatures for the two channels was analyzed. The FY-3 actual observation data at Qinghai Lake in September 2008 was used to examine the relationship. The comparison of the results indicates that the brightness temperatures for both channels calculated by LBLRTM agree each other well, but the temperature obtained from MERSI is lower than that from VRR. The temperature difference between the two channels increases with the increase of temperature. Because FY-3 actual observations are affected by many factors, VRR temperature is lower than MERSI, which is different from the theoretical result of the model. The matched MODIS data is used to compare with MERSI and VRR. It is concluded that VRR might underestimate the temperature. The deviation of MODIS and MERSI temperatures is within the absolute accuracy of the temperature measurements. The results described here should be valuable for assessing the similarities and differences for the two similar infrared channels of MERSI and VRR.

**Key words:** FY-3; visible and infrared radiometer (VRR); medium resolution spectral imager (MERSI); infrared channel; brightness temperature

## 引言

卫星红外图像在探测地球上各种不同的地表方面是非常重要的,在探测云特性<sup>[1]</sup>、海洋表面的温度方面也很有价值.随着探测仪器及探测通道的不断增多,许多卫星或同一卫星上设有相近或相似的红外探测通道,这些通道探测同一地方的温度差异直接依赖于红外通道的定标精度、光谱响应函数等因素.

中国已发射成功的风云三号(简称FY-3)卫星是在风云一号卫星的基础上发展起来的新一代极轨气象卫星,是中国首颗高性能综合探测卫星,其探测性能比风云一号卫星有显著的提高.风云三号气象卫星搭载了11种遥感仪器,其中包括以往风云一号卫星搭载的扫描辐射计(VRR)和新增加的中分辨率光谱成像仪(MERSI).中分辨率光谱成像仪是FY-3卫星主要遥感仪器之一,设有20个通道,但是只有第五通道为热红外窗区探测通道,中心波长11.25 $\mu$ m,光谱带宽2.5 $\mu$ m,空间分辨率可达250m.可见光红外扫描辐射计(VRR)第四通道与MERSI第五通道波段位置相近,波长范围为10.3~11.3 $\mu$ m.为了满足现代气象业务特别是数值天气预报业务的发展以及气候研究上定量应用的要求,将这些相似的通道进行对比研究是很有必要的<sup>[2]</sup>.本文从理论模拟和实际观测两个方面对这两个相似通道进行了简要的对比分析.

## 1 LBLRTM 模式模拟

根据上世纪50年代美国科学家提出的卫星红外大气探测原理,在红外波段,假设大气为局地热平衡的平面平行无散射介质,同时忽略地球曲率的影响,大气辐射传输方程可写成如下形式:

$$L(\lambda, \mu) = \int_{p_0}^p B[T(P)] \frac{d(P, \lambda)}{dP} dP + \int_{p_0}^p B[T(P_0)] \frac{d(P_0, \lambda)}{dP} dP, \quad (1)$$

式中,右边第一项为地面辐射项,表示从地面发射的辐射透过大气层进入空间部分的辐射;第二个积分项表示从地面到大气顶整层气体发出并能进入空间的辐射.由于卫星探测通道具有一定的光谱宽度,对于卫星探测的大气层顶向上的红外辐射还需要将单色红外大气辐射与卫星探测通道的光谱响应函数作卷积处理:

$$\bar{L}(\lambda, \mu) = \int_1^2 L(\lambda, \mu) f(\lambda - \mu) d\lambda, \quad (2)$$

其中函数 $f(\lambda - \mu)$ 表示光谱响应函数,式(2)即为计算卫星在红外波段接收到的地气系统发射的辐射率的表示式.

根据透过率计算的方法,国际上存在两类大气红外辐射传输的计算模型,即快速模型和精确模型.第一类快速模型是参数化模式,特点是精确度高,且计算速度快.另一类精确模型一般采用逐线积分(LBL)的方法,即按红外光谱顺序,依次、逐条地计算大气气体吸收谱线的贡献,其特点是计算速度较慢,计算精度高.逐线积分计算的结果可以表征红外大气辐射传输计算的标准.本文采用的是精确高效的逐线积分辐射传输模型LBLRTM<sup>[3]</sup>,它是从20世纪70年代美国科学家们开发的FASCODE(Fast Atmospheric Signature Code)发展而来的.LBLRTM使用了最新的线型计算技术和比较新的谱线参数库,散射计算使用LOWTRAN7模式.

模拟所用的52条大气廓线提取于ECMWF40年再分析(ERA-40)产生的13495条廓线数据集,充分代表了大气在温度、水汽和臭氧上的所有可能变化.Saunders等人<sup>[4]</sup>详细给出了这些廓线的特征,廓线共有101层,直到0.005hpa,每层厚度从近地面的约200m到高层的几千米.部分廓线位于高海拔的地区或者冰盖上,模式计算时地表高度由地表气压来定义.图1给出了这些廓线的温度变化特征,1000hpa层温度变化从220~320K,覆盖了从极区到热带.温度廓线在任何高度上都与水汽、臭氧含量保持一致是采用这些廓线集的优势.其中第50~52条廓线是人为计算得到的,分别是13495条廓线数据的最小值、最大值和平均值.模拟计算中,对于地表发射率,假设为常数0.99,温度采用所附带的地表温度.对于其它气体成分,采用了模式默认值.模拟的波段为8~14 $\mu$ m,卫星观测角度假设为星下点观测.

以往的研究表明<sup>[5]</sup>,宽波段长波辐射和11 $\mu$ m处的辐射值之间存在强的相关性.由于这些相关性,宽波段数据的任何趋势都可以按照观测区域的光谱变化特征,映射到相应的窄波段通道上.因此说,波长处于11 $\mu$ m附近的高精度的波段数据在监测宽波段长波辐射数据的变化趋势方面是非常有用的.图2给出了MERSI第五通道和VRR第四通道的光谱响应函数.由图可见,MERSI第五通道较宽,在波段宽度内存在两个峰值,而VRR CH4通道较窄,但二者在11 $\mu$ m附近非常相似.

利用LBLRTM模拟的结果,与光谱相应函数进

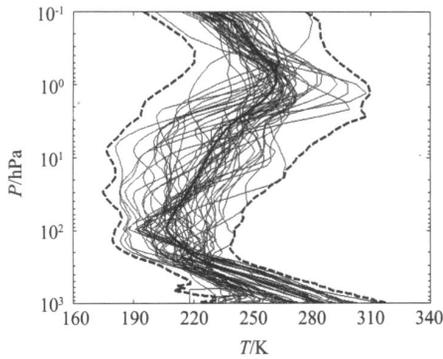


图1 ERA-40分发的52条廓线集的温度变化特征,最小值与最大值由两条虚线表示,平均值由中间的粗黑线表示  
Fig.1 The profiles generated by ERA-40 for temperature used for LBLRTM model. The exteme profiles are indicated by dashed lines and the mean profile by the thick dashed line

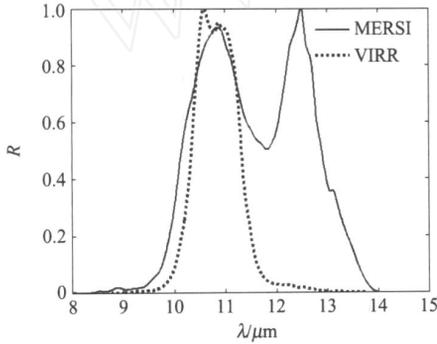


图2 MERSI第五通道和VIRR第四通道的光谱响应函数  
Fig.2 The spectral response function for MERSI 5-channel and VIRR 4-channel

行卷积,得到了卫星观测到的大气顶出射辐射率.图3中以亮温表示了MERSI和VIRR对比的散点图.由图可见,MERSI与VIRR两个相似通道的亮温展现了较好的一致性和线性关系,这是由二者光谱响应函数的相似性决定的.从二者偏差来看,平均差并不大,约为-0.6K(MERSI-VIRR),MERSI亮温稍微低于VIRR.但随着温度的升高,二者的偏差开始增大,二者偏差与温度之间也存在着一定的线性关系,低温时二者差异近于零,但在高温部分,最大差异可达约-2K左右.

## 2 观测数据的对比

观测的理论模拟能抓住辐射传输的物理本质,结果清晰简明.但实际观测中由于各种因素的影响,结果较为复杂.FY-3中分辨率光谱成像仪和扫描辐射计接收到的原始观测值要经过定标、定位和投影等处理步骤才能得到所需要的亮温数据.

为了检验模拟结果,对FY-3 MERSI和VIRR实

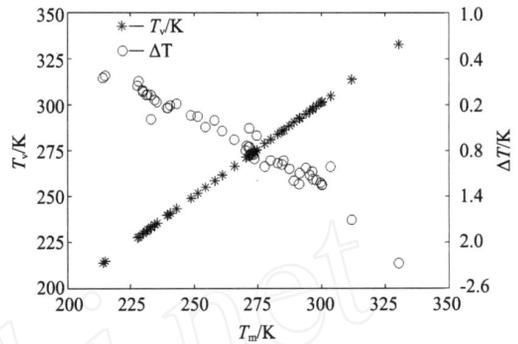


图3 MERSI与VIRR模拟亮温比较图.横坐标表示MERSI亮温,左边纵坐标轴表示VIRR亮温,右边纵坐标轴表示二者亮温之差(MERSI-VIRR),单位K  
Fig.3 Comparison of brightness temperature between MERSI and VIRR. The horizontal axis is MERSI brightness temperature. The left vertical axis is VIRR brightness temperature and the right vertical axis is the difference of brightness temperature for MERSI and VIRR (MERSI - VIRR). Units is kelvin

际观测数据进行了比较.比较的地点选择在中国遥感卫星热红外辐射校正场所在地——青海湖.青海湖处于海拔高约3196m的高原地区,水面温度较低,夏季平均水面温度为12.4℃,水平梯度平均为0.03℃/km<sup>[6]</sup>,因此水表发射率分布较为均匀,符合LBLRTM模式模拟中地表发射率为常数的假定.青海湖试验区所选择的对比区域面积大小约为20×20km<sup>2</sup>,2008年9月8日中午,FY-3气象卫星过境青海湖上空,大部分视场内晴朗无云,国家卫星气象中心在青海湖实施了FY-3卫星辐射校正外场试验.

图4(a)给出了2008年9月8日03时35分FY-3过境青海湖时MERSI和VIRR的亮温对比的散点图.从图中可以看出,大部分数据集中于水平坐标284~285K附近,表明水面温度变化不大,在这较小的温度变化范围内,VIRR与MERSI之间没有明显的线性关系.所有数据点处于直线Y=X下方,表明VIRR观测亮温明显低于MERSI.图4(b)为VIRR与MERSI之间亮温差的统计直方图,二者平均偏差(MERSI-VIRR)为2.8K,标准差为0.5K.从图中二者之差近似于正态分布可以看出,不考虑系统偏差的情况下,较小的标准差表明MERSI与VIRR在低温段的观测一致性较好,这一点与模拟比较的结果是一致的.

通过对比FY-3扫描辐射计红外第四通道与中分辨率光谱成像仪第五通道在青海湖实际观测亮温,可以发现,MERSI观测的实际亮温数值要高于VIRR,这一点与模拟情况存在差异;模拟表明VIRR要稍高于MERSI,在不考虑偏差的情况下,二者差

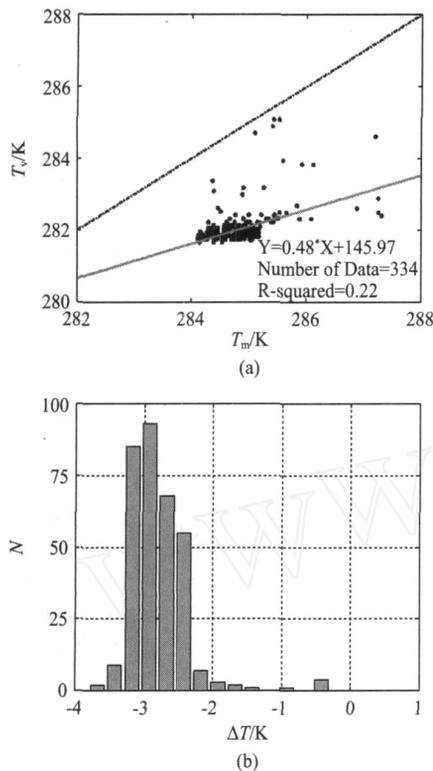


图4 2008年9月8日03时35分(世界时),青海湖辐射校正场  $20 \times 20 \text{ km}^2$  区域内 FY-3 VIRR/MERSI亮温观测对比图。(a)横坐标为MERSI CH5亮温,纵坐标为VIRR CH4亮温,实线为拟合直线,虚线为直线  $Y=X$  (b) VIRR与MERSI之间亮温之差的统计分布直方图

Fig. 4 The scatter plot of brightness temperature between MERSI and VIRR for  $20 \times 20 \text{ km}^2$  field at radiation calibration site at QingHai lake, observation time is at 03 35h on Sep 8, 2008 (UTC). (a) The X-axis is MERSI CH5 brightness temperature. The solid line is linear fit and the  $Y=X$  line is represented by dashed line. (b) The statistical histogram for the difference between VIRR and MERSI

值近似于正态分布,表明二者对同一目标物的观测有较好的一致性。

MERSI与VIRR实际观测亮温出现了较大的偏差表明,二者之一对温度的探测存在误差,或是二者都存在不同程度的偏差。为了确认出现较大偏差的原因,我们又分别把MERSI和VIRR在青海湖的观测与MODIS数据作了比较,MODIS所选择的通道为第31通道,波长范围  $10.78 \sim 11.28 \mu\text{m}$ ,波段设置与VIRR第四通道较为相似。MODIS数据的获取时间为2008年9月8日04时12分,晚于FY-3观测约37分钟,在这约半个多小时的时间段内,我们假定青海湖水表温度变化不大,所以可以将FY3观测与MODIS作一对比。图5给出了MERSI与MODIS的统计直方图,由图5可见,数据分布接近于正态分

布,且不存在系统偏差,二者平均差(MERSI-MODIS)约为  $-0.3 \text{ K}$ ,标准差为  $0.5 \text{ K}$ ,因此,MERSI与MODIS结果一致性较好。根据MenZel等人的研究<sup>[7]</sup>,小于  $1.0 \text{ K}$ 的温度差异可能是温度探测的绝对精度,因此,尽管MODIS与MERSI在探测时间上存在半小时左右的差异,但MERSI和MODIS相符合程度仍然在温度探测的绝对精度之内,说明MERSI红外第五通道的探测精度可与MODIS相似的通道相比。图6给出了VIRR和MODIS在青海湖的数据对比统计直方图,由图可见,在整个对比区域上,MODIS亮温明显要高于VIRR约  $3 \text{ K}$ 左右,且数据分布与正态分布有较大的偏离。数据统计结果示于表1。

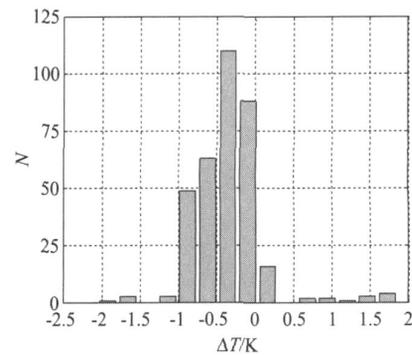


图5 2008年9月8日,青海湖辐射校正场  $20 \times 20 \text{ km}^2$  区域内 MERSI与MODIS亮温之差(MERSI-MODIS)统计分布直方图。MODIS观测时间晚于MERSI约37分钟

Fig. 5 The statistical histogram for brightness temperature difference between MERSI and MODIS for  $20 \times 20 \text{ km}^2$  field at radiation calibration site at QingHai, MODIS observation time is later about 37 minutes than MERSI on Sep 8, 2008 (UTC)

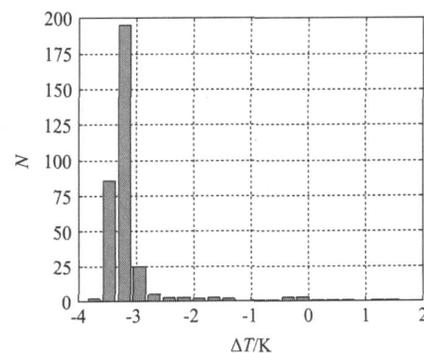


图6 2008年9月8日,青海湖辐射校正场  $20 \times 20 \text{ km}^2$  区域内 VIRR与MODIS亮温之差统计直方图,MODIS观测时间晚于VIRR约37分钟

Fig. 6 The statistical histogram for brightness temperature difference between VIRR and MODIS for  $20 \times 20 \text{ km}^2$  field at radiation calibration site at QingHai, MODIS observation time is later about 37 minutes than VIRR on Sep 8, 2008 (UTC)

表 1 青海湖 VIRR, MERSI和 MOD IS亮温的对比统计  
Table 1 Statistic of comparison of brightness temperature among VIRR, MERSI and MOD IS at Qinghai Lake

	Study Area (km <sup>2</sup> )	Mean Bias (K)	Standard Deviation (K)
VIRR-MERSI	20 × 20	- 2.8	0.5
VIRR-MOD IS	20 × 20	- 3.0	0.7
MERSI-MOD IS	20 × 20	- 0.3	0.5

综合上述 3种遥感仪器的对比分析,可以确认, MERSI-MOD IS之间的观测符合较好,亮温误差在温度探测的绝对精度之内。VIRR亮温低于 MOD IS约 3K,低于 MERSI约 2.8K,这意味着 VIRR可能过低地估计了温度。结合第一节中的 LBLRTM 理论模拟结果,可以确认 VIRR与 MERSI之间的这种差异不能由光谱响应函数的差异来解释。准确定位引起这一偏差的原因存在一定的困难,分析可能是由于定标<sup>[8]</sup>或者仪器状态等问题,这仍然值得做进一步的研究。

### 3 结论

针对中国新一代气象卫星 FY-3上搭载的中分辨率光谱成像仪和扫描辐射计的红外窗区通道,即 MERSI第五通道和 VIRR第四通道,从辐射传输前向模拟和实际观测两个方面对上述两个通道进行了比较。LBLRTM 辐射传输模式模拟结果表明,宽波段的 MERSI与窄波段的 VIRR亮温较一致,有较强的线性关系,VIRR亮温要稍高于 MERSI实际观测数据的对比表明,二者有较好的一致性,但 VIRR结果低于 MERSI为了确认 MERSI与 VIRR之间实际观测数据之间偏差的原因,将 MOD IS数据也进行了比较,确认了 VIRR可能存在的一个低温误差,并且这一误差是不能由光谱响应函数的差异来解释的。尽管 MOD IS与 MERSI之间在探测地点上过境时间存在约半个小时的差异,MERSI与 MOD IS之间的符合程度令人满意,在温度探测的绝对精度范围之内,表明 MERSI红外第五通道探测精度达到了较高的水平。

本文的研究有助于理解中分辨率光谱成像仪红

外宽波段与扫描辐射计红外窄波段窗区通道亮温之间的关系,对于观测数据可能的定量应用也有一定的价值。

致谢 感谢国家卫星气象中心胡秀清和张里阳两位同事,他们分别为本项工作提供了中分辨率光谱成像仪数据和可见光红外扫描辐射计数据,并对数据的处理提供了帮助。感谢两位匿名评审专家对本文提出了有益的建议。

### REFERENCES

- [1] Sherwood S C, Chae J-H, Minnis P, *et al* Underestimation of deep convective cloud tops by thermal imagery[J]. *Geophys Res Lett*, 2004, **31**, L11102, doi: 10.1029/2004GL019699.
- [2] Minnis P, Nguyen L, Doelling D R, *et al* Rapid calibration of operation and research meteorological satellite imagers Part 1: Comparison of infrared channels[J]. *J. Atmos Oceanic Technol*, 2002, **19**, 1233—1249.
- [3] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, *et al* Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes[J]. *J. Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, **91**, 233—244.
- [4] Saunders R, Rayer P, Brunel P, *et al* A comparison of radiative transfer models for simulating Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) radiances[J]. *J. Geophys Res*, 2007, **112**, D01S90, doi: 10.1029/2006JD007088.
- [5] Doelling D R, Minnis P, Spangenberg D A, *et al* Cloud radiative forcing during FIRE ACE derived from AVHRR data[J]. *J. Geophys Res*, 2001, **106**: 15279—15296.
- [6] LI Huang Copus Chinese remote sensing satellites radiometric calibration sites contribution [C]. Beijing: Ocean Press (李黄. 中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编,北京:海洋出版社), 2001, 156—165.
- [7] Menzel W P, Purdom J F W. Introducing GOES-I The first of a new generation of Geostationary Operational Environmental Satellites[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1994, **75**: 757—781.
- [8] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, *et al* On orbit radiometric calibration of FENGYUN geostationary meteorological satellite's infrared channel based on sea surface measurements in the South-China sea[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国,张玉香,贾凤敏,等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(2): 97—101.