

文章编号 1004-924X(2015)07-1892-11

VIRR/FY-3A 分裂窗波段与 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 数据的交叉辐射定标

周 蔚*, 蒋耿明

(复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要:实际应用显示搭载在风云三号 A 星(FY-3A)上的可见光红外扫描辐射计(VIRR)的两个分裂窗波段(IR4, $\sim 10.8 \mu\text{m}$; IR5, $\sim 12.0 \mu\text{m}$)存在定标偏差。本文选择高光谱卷积法,用 AQUA 卫星搭载的大气红外探空仪(AIRS/AQUA)和 METOP-A 卫星搭载的干涉式红外大气探测仪(IASI/METOP-A)的观测数据对 VIRR/FY-3A 的两个分裂窗波段进行交叉辐射定标。根据卫星轨道特点,选择北极地区($60^\circ\text{N}\sim 90^\circ\text{N}$, $180^\circ\text{W}\sim 180^\circ\text{E}$)作为研究区域,并选择 2010 年 6 月、9 月、12 月以及 2011 年 3 月作为研究时间段。首先,分别将 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 数据与 VIRR/FY-3A 的第 4 波段和第 5 波段的光谱响应函数进行卷积;对观测数据进行重采样,并基于普朗克黑体辐射公式实现辐射值和亮度温度之间的转换。然后,使用两个相关的匹配条件提取 VIRR/FY-3A 分别与 AIRS/AQUA、IASI/METOP-A 在第 4 波段和第 5 波段的匹配观测点对。最后,对匹配观测点对进行回归分析,得到交叉辐射定标偏差订正方程的系数。结果表明 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 的在轨辐射定标非常一致。以 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 波段的辐射定标为标准,VIRR/FY-3A 第 4 波段的平均定标偏差分别为 2.39 K 和 2.06 K,第 5 波段的平均定标偏差分别为 0.59 K 和 0.44 K。实验指出定标偏差与亮度温度有关。

关键词:可见光红外扫描辐射计/FY-3A;分裂窗波段;大气红外探空仪/AQUA;干涉式红外大气探测仪/METOP-A;交叉辐射定标;高光谱卷积法

中图分类号:TP73;P414.4 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152307.1892

Cross-calibration of VIRR/FY-3A split-window channels with AIRS/AQUA and IASI/METOP-A data

ZHOU Wei*, JIANG Geng-ming

(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves,
Fudan University, Shanghai 200433, China)

* Corresponding author, E-mail:wei.zh0916@gmail.com

Abstract: Some practical applications indicate that there is calibration deviation in the on-orbit radiometric calibration of the two split-window channels(IR4, $\sim 10.8 \mu\text{m}$; IR5, $\sim 12.0 \mu\text{m}$) on the Visible and Infrared Radiometer(VIRR) mounted in FY-3A. Therefore, this paper applies high-spectral convolution method to implementation of the cross radiometric calibration for the two split-window channels of VIRR/FY-3A based on the observation data from the Infrared Atmospheric Sounding Interfer-

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-04-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41271012, No. 61331020)

ometer/METOP-A (IASI/METOP-A) and the Atmospheric Infrared Sounder /AQUA (AIRS/AQUA). According to the characteristics of the satellite orbit, the Arctic region ($60^{\circ}\text{N}-90^{\circ}\text{N}, 180^{\circ}\text{W}-180^{\circ}\text{E}$) was chosen as the research area, and June, September, December 2010 and March 2011 were selected as the research satellite orbit spectral response functions of the 4th and 5th channels of VIRR/FY-3A. Then, the Planck blackbody radiation formula was used to achieve the conversion between radiation value and brightness temperature. On the basis on the corresponding matching conditions, the matching observation points between the 4th and 5th channels of VIRR/FY-3A and AIRS/AQUA, the 4th and 5th channels of VIRR/FY-3A and IASI/METOP-A were extracted, respectively. Finally, the regression of matching observation point pairs was analyzed to obtain the cross radiometric calibration coefficients. The experimental results show that the proposed high-spectral convolution method with IASI/METOP-A and AIRS/AQUA for the cross calibration has the same calibration results. By using IASI/METOP-A and AIRS/AQUA as the standard, the brightness temperature biases for the 4th channel of VIRR/FY-3A are 2.39 K and 2.06 K; and those for the 5th channel of VIRR/FY-3A are 0.59 K and 0.44 K. This work indicates that calibration deviation is related to the brightness temperature.

Key words: Visible and Infrared Radiometer/FY-3A; split-window channel; Atmospheric Infrared Sounder/AQUA; Infrared Atmospheric Sounding Interferometer/METOP-A; cross-calibration; high-spectral convolution method

1 序 言

交叉辐射定标(Radiometric Cross-Calibration, RCC)把经过精确定标的传感器波段的定标系数传递给待定标传感器,是一种有效的在轨辐射定标手段^[1],可以实现不同卫星传感器数据的同化和转化。

定标是定量遥感的前提,其精度直接影响产品数据的精度。我国从20世纪90年代就开始场地定标。2008年9月,国内科学家第一次采用反射比基法并配合新的地表比修正算法,对搭载在“风云三号”(FY-3)A星上的可见光红外扫描辐射计(Visible and Infrared Radiometer, VIRR)进行在轨场地定标,观测目标的表观反射比与TERRA°卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(TERRA/MODIS)相应通道结果一致^[2,3]。近年来国内外开始研究无场地定标技术,充分利用多种数据源,建立起多卫星数据共用的数据链^[2]。漆成莉等利用美国地球极轨卫星搭载的大气红外探空仪(AIRS/AQUA)对FY-1C、FY-1D气象卫星的热红外通道进行交叉定标,并用准真值再定标得到新的定标系数^[4]。徐娜等利用干涉式红外大气探测仪(IASI)和AIRS对FY-2静止气象卫星的

VISSR红外通道进行绝对交叉定标,证明高光谱交叉定标方案稳定可靠,精度满足定量应用需求^[5]。胡秀清等用AIRS和IASI数据,对FY-2的热红外通道做了长时间监测和校正^[6],对FY-3A和FY-3B的热红外通道做了长时间序列的在轨辐射定标研究^[7-8]。

FY-3系列卫星是我国第二代极轨气象卫星,目前在轨运行的有A星、B星和C星,每颗卫星上搭载11种传感器,覆盖了紫外、可见光、红外和微波等波谱范围。其中,可见光红外扫描辐射计共有10个探测波段,光谱为 $0.58\sim 12.5\ \mu\text{m}$,星下点分辨率和地面幅宽分别为1.1 km和2 941 km^[9]。根据传感器技术参数,VIRR/FY-3A观测数据可用于多种地球表面参数的反演,例如可用分裂窗算法从第4波段(IR4, $\sim 10.8\ \mu\text{m}$)和第5波段(IR5, $\sim 12.0\ \mu\text{m}$)数据反演地表和海表温度^[10]。但其第4和第5波段的在轨辐射定标存在一定的误差,因此在反演应用前有必要对其进行精确的辐射定标。

FY-3卫星的总体性能接近欧洲极轨卫星METOP和美国地球极轨卫星AQUA。METOP-A和METOP-B分别于2006年10月和2012年12月发射,搭载的干涉式红外大气探测仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferome-

ter, IASD)共有 8 461 个波段,覆盖 3.62~15.5 μm 的光谱,光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} ,辐射分辨率为 0.1~0.5 K,其星下点的空间分辨率为 12 km。AQUA 卫星于 2002 年 5 月发射,搭载的大气红外探空仪 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS),有 4 个可见光和近红外波段,2 378 个红外波段。红外波段的光谱为 3.74~15.39 μm ,星下点的空间分辨率为 13.5 km。

由于 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 的红外波段不仅具有较高的辐射定标精度和稳定性,而且在光谱上均完全覆盖 VIRR/FY-3A 的第 4 和第 5 热红外波段^[4-7]。因此,本文用 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 数据对 VIRR/FY-3A 的两个分裂窗波段进行交叉辐射定标,所使用的方法为高光谱卷积法。

2 交叉辐射定标方法

交叉辐射定标主要有辐射传输模拟法 (Radiative Transfer Modeling method, RTM)、光线匹配法 (Ray Matching method, RM) 和高光谱卷积法 (High-spectral Convolution method, HSC)。这三种方法各有不同的适用条件^[11]。光线匹配法不受云雨的影响,但是不能考虑不同波段之间光谱响应函数的差异。辐射传输模拟法虽然能消除光谱响应函数带来的差异影响,但一般只适用于晴空大气条件。高光谱卷积法同时具有光线匹配法和辐射传输模拟法的优点,完全克服了上述两种方法的缺点,但是只适用于被高光谱波段完全覆盖的传感器波段。高光谱卷积法将稳定且高精度的高光谱数据与相对较宽的待定标传感器波段的光谱响应函数进行卷积,并在相同时间、地点和观测角度下,对卷积值与待定传感器的实际观测值进行回归分析,最终确定定标系数。

本文采用高光谱卷积法进行交叉辐射定标。在相同地点、时间和观测角度的条件下,一个较宽波段的观测值可以用高光谱数据与该波段的光谱响应函数的卷积表示^[12],即:

$$R_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) R_\lambda(n) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

其中: $f_i(\lambda)$ 为待辐射定标传感器的光谱响应函数, λ_1 和 λ_2 分别为光谱响应函数中的最小和最大波长, $R_\lambda(n)$ 为高光谱传感器波长为 λ 的波段 n 的辐射值, R_i 为卷积辐射值。

匹配传感器卷积后的辐射值与待定传感器的实际观测值,进行回归分析,确定定标方程。交叉辐射定标一般用通道亮度温度代替辐射值。第 i 波段辐射值和亮度温度的关系为:

$$R = \frac{C_1}{\lambda^3 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)}, \quad (2)$$

其中: $B(T)$ 为普朗克方程,即:

$$B(T) = \frac{C_1}{\lambda^3 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)}, \quad (3)$$

式中: R 是亮度温度为 T (单位: K) 和频率为 f 时的辐射值。 $C_1 = 1.191\ 04 \times 10^{-16}$ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{m}^{-4} \text{sr}^{-1})$, $C_2 = 0.0143\ 877$ mK 。

VIRR/FY-3A 第 4 和第 5 波段的亮度温度与卷积后的 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 的观测值的关系式分别为^[13-14]:

$$T_{b,i,AIRS} = S_{i,AIRS} \cdot T_{b,i,VIRR} + I_{i,AIRS}, \quad (4)$$

$$T_{b,i,IASI} = S_{i,IASI} \cdot T_{b,i,VIRR} + I_{i,IASI}, \quad (5)$$

其中: $T_{b,i,AIRS}$ 和 $T_{b,i,IASI}$ 分别为 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 卷积后的亮度温度; $T_{b,i,VIRR}$ 为 VIRR 第 i 波段辐射定标前的亮度温度, S_i 和 I_i 分别为 VIRR/FY-3A 传感器第 i 波段与卷积后的 AIRS/AQUA、IASI/METOP-A 交叉辐射定标的定标斜率和截距。

3 研究数据及处理

本文使用经过定位和定标的 VIRR/FY-3A L1 数据、AIRS/AQUA 1B 红外数据和 IASI/METOP-A 1C 数据。除了观测值,数据产品还包含经纬度坐标、观测角度和观测时间等信息。图 1 所示为 VIRR/FY-3A 第 4 和第 5 波段的光谱响应函数,以及在此范围内 IASI/METOP-A 和 AIRS/AQUA 的亮度温度曲线。

FY-3 系列卫星和 METOP 卫星、AQUA 卫星都是极轨卫星,每天扫描的轨道都会经过北极地区,纬度越高,扫描次数越多,因此能够获取匹配的点对越多。为了获得足够数量的相同观测条件下的匹配点对,选择 $60^\circ \text{N} \sim 90^\circ \text{N}$, $180^\circ \text{W} \sim 180^\circ \text{E}$ 作为研究区域,如图 2 所示。为了便于空

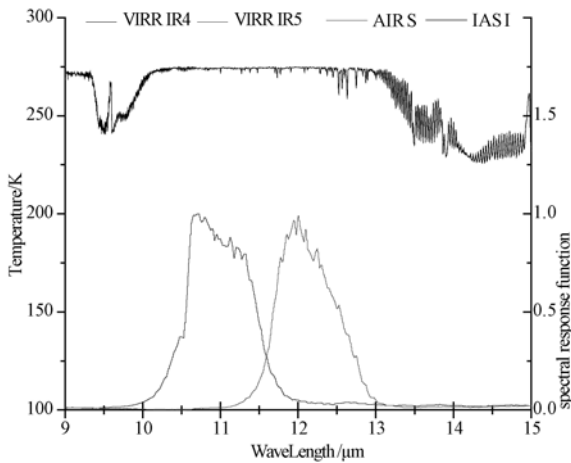


图 1 VIRR/FY-3A 第 4 波段(IR4, ~10.8μm)和第 5 波段(IR5, ~12.0μm)的光谱响应函数,以及高光谱传感器 IASI/METOP-A 和 AIRS/AQUA 的亮度温度曲线

Fig. 1 Spectral response functions of VIRR/FY-3A channels 4 (IR4, ~10.8μm) and 5 (IR5, ~12.0μm), and brightness temperatures of IASI/METOP-A and AIRS/AQUA

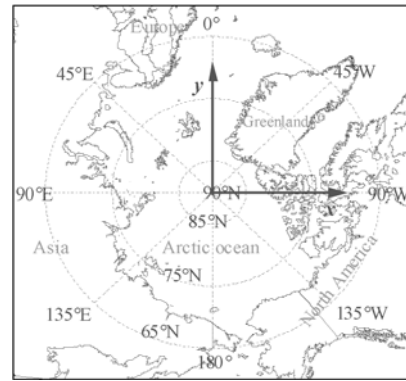


图 2 研究区域和 $x-y$ 直角坐标系
Fig. 2 Study area and $x-y$ coordinate system

间配准,需要把研究区域的经纬度坐标转换成如图 2 所示的 $x-y$ 直角坐标系。转换公式为^[11]:

$$\begin{cases} x = (90 - \varphi)\cos\zeta \\ y = (90 - \varphi)\sin\zeta \end{cases}, \quad (6)$$

$$\text{其中 } \zeta = \begin{cases} \vartheta + 90, & \vartheta \leq 270^\circ \\ \vartheta - 270, & \text{otherwise} \end{cases},$$

$$\vartheta = \begin{cases} \theta, & \text{if } \theta \geq 0^\circ \\ \theta + 360, & \text{if } \theta < 0^\circ \end{cases}$$

θ 和 φ 分别是经度和纬度,单位为($^\circ$)。

北极地区极昼和极夜现象分明,为了获得具有代表性和大动态范围的匹配观测点对,本文选择 2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月为研究时间段。4 个月的数据分别代表夏、秋、冬、春,且获取到一年中温度最高和最低的时段,能反映季节特点。

VIRR/FY-3A L1 数据和 AIRS/AQUA 1B 数据以 HDF(Hierarchical Data Format)格式存储,在 HDF 函数库的基础上开发出 C 程序读取这些数据。而 IASI/METOP-A 数据以 NOAA 定义的格式存储,利用 FORTRAN 程序提取

数据。

为使 VIRR/FY-3A 影像和卷积后的 AIRS/AQUA、IASI/METOP-A 影像能够匹配,需要将所有的卫星数据重采样到图 2 所示的研究区域中。反距离加权算法基于相近相似原理,每个采样点都对插值点具有一定影响,即权重。距离插值点越近,采样点权重越大,权重随着采样点和插值点之间距离的增加而减弱,并且规定当采样点在距离插值点一定范围以外,权重为 0。反距离加权方法为:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot \frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \quad (7)$$

其中: z 为插值输出值, z_i 为落入插值区域的第 i 个观测值, d_i 为第 i 个观测点到插值点的距离。

采用反距离加权方法,采样间隔 $\Delta x = \Delta y = 1$,插值区域是以待插值像素点为中心的 2×2 。离散化后的研究区域为 61×61 。除了辐射值,反距离加权重采样的数据还包括观测时间和观测角度等参数。根据式(2)建立波段亮度温度和辐射值查找表,可实现辐射值和亮度温度的转换。

由于条带噪声和无效数据值等因素的影响,重采样后的 VIRR/FY-3A 的数据与卷积重采样的 AIRS/AQUA 数据、IASI/METOP-A 数据都存在一些粗差,会影响交叉辐射定标的精度。数据包含了每一个像素数据有效性的描述,即存在 QA 值。当 QA 值与正确稳定的值不符合时,将其标记便于有效数据的整理使用。为了消除条带

噪声和数据有效性等产生的粗差对定标结果的影响,剔除标记的数据。

另外,太阳的照射对卫星传感器也有一定的影响,当太阳照射时卫星本身的温度升高,反之迅速冷却。在卫星的运行过程中,卫星与太阳位置关系有两种:卫星被太阳照射;卫星在地球的阴影中。当太阳天顶角(θ_s)小于 90° 时,卫星被太阳照射。当太阳天顶角(θ_s)大于 90° 时,交点 P 是地心、卫星连线的延长线与地球太阳切线连线延长线的交点,如图 3 所示。交点 P 到地心的距离为:

$$d = R_2 / \sin(\theta), \quad (8)$$

其中:

$$\theta = 270 - \theta_s - \arccos[(R_1 - R_2)/D] + \arcsin[R_2 \sin(180 - \theta_s)/D]$$

R_1 为太阳半径 ($\sim 696\,300\text{ km}$), R_2 为地球半径 ($\sim 6\,371.3\text{ km}$), D 是日地距离 ($\sim 149\,597\,870.69\text{ km}$), H 为卫星高度。当 $d > R_2 + H$ 时,卫星和地表都没有被太阳照射;反之,卫星被照射,地表没有被照射。也就是说卫星在地球的阴影中。

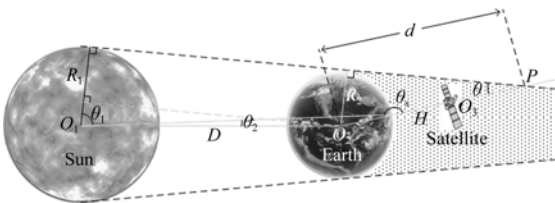


图 3 太阳、地球和卫星的空间位置关系(太阳半径 R_1 , 地球半径 R_2 , 日地距离 D , 卫星高度 H , 太阳天顶角 θ_s)

Fig. 3 Geometric relationship among the Sun, the Earth and satellite (R_1 : Sun radius, R_2 : Earth radius, D : Sun-Earth distance, H : satellite altitude, θ_s : sun zenith angle at nadir)

一般交叉辐射定标的条件是相同地点、时间和观测角度,但是严格定标条件下提取的匹配点对将很少。因此,在保证足够观测点对的前提下,对匹配条件适当放大,即:在同地点、观测时间差绝对值小于某阈值且 $|\cos\theta_1/\cos\theta_2 - 1| < 0.015$

(θ_1 和 θ_2 分别为两个不同传感器的观测天顶角)的条件下提取匹配观测点对。

由于研究时间序列从 2010 年 6 月跨度到 2011 年 3 月,根据卫星、地球和太阳的运行轨道出现了 2 种情况:1) 卫星被太阳照射;2) 卫星在地球的阴影中。对传感器重采样后的图像逐像素扫描,找出满足上述近似匹配条件的观测点对。

工作流程如图 4 所示,主要包括卫星影像获取、空间配准(重采样)、高光谱卷积、亮度温度和辐射值转换、光谱匹配、辐射定标系数确定等。

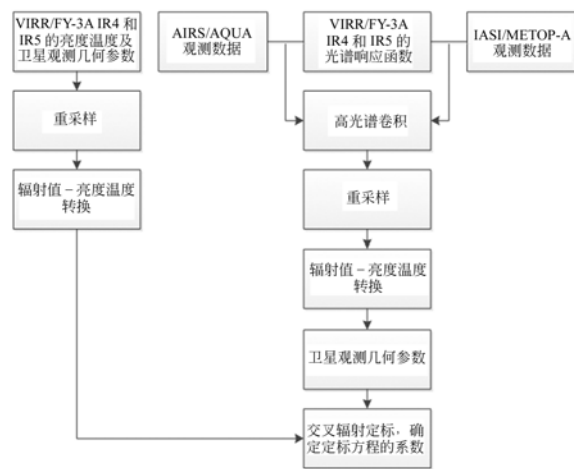


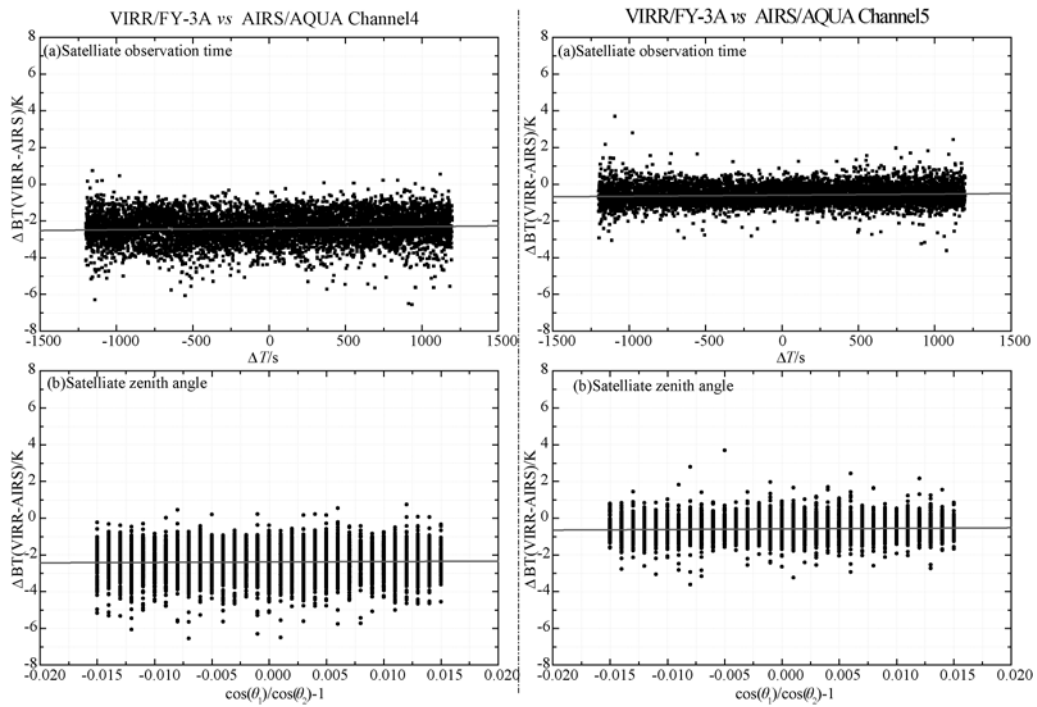
图 4 交叉辐射定标工作流程

Fig. 4 Cross-calibration process

4 定标结果与分析

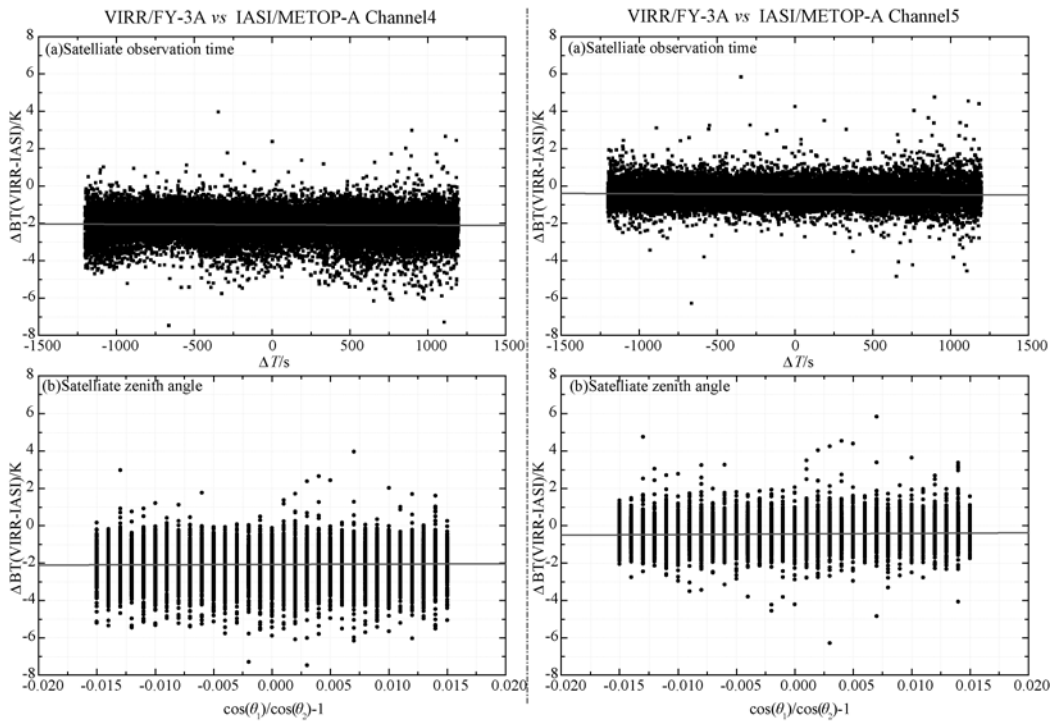
4.1 匹配条件对交叉辐射定标的影响

为了评估匹配条件对交叉辐射定标结果的影响,图 5 给出了匹配点对亮温差随时间和角度的变化。以卷积后的 AIRS/AQUA 和 VIRR/FY-3A 为例,考虑匹配观测点亮温差分别随时间和角度匹配条件变化的分布情况(图 5(a))。时间和角度匹配条件变化为 x 轴,匹配观测点亮温差为 y 轴进行线性拟合,第 4 波段和第 5 波段拟合的直线都几乎与 x 方向平行。卷积后的 IASI/METOP-A 和 VIRR/FY-3A 具有相似的结果。结果表明,两个传感器之间的亮度温度的差异并不受放大后的定标条件影响,可以适当放大。



(a) 卷积后的AIRS/AQUA和VIRR/FY-3A的亮度温度差随时间和角度的变化

(a) Brightness temperature difference between convoluted AIRS/AQUA and VIRR/FY-3A channels 4th and 5th



(b) 卷积后的IASI/METOP-A和VIRR/FY-3A的亮度温度差随时间和角度的变化

(b) Brightness temperature difference between convoluted IASI/METOP-A and VIRR/FY-3A channels 4th and 5th

图 5 两个传感器之间的亮度温度差异, ΔBT 为两个传感器的亮度温度差异, 参考因素为观测时间差和观测天顶角差, θ_1 和 θ_2 为两个传感器的观测天顶角

Fig. 5 Brightness temperature difference with observation time difference (a); satellite zenith angle (b), ΔBT means brightness temperature difference, θ_1 and θ_2 are the view zenith angles of different sensors

图 6 显示了匹配图像对的过境日期,图 6(a)为卷积后的 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 匹配观测点对的过境日期分布,图 6(b)为 VIRR/FY-3A 分别与卷积后的 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 的匹配观测点对过境日期分布。

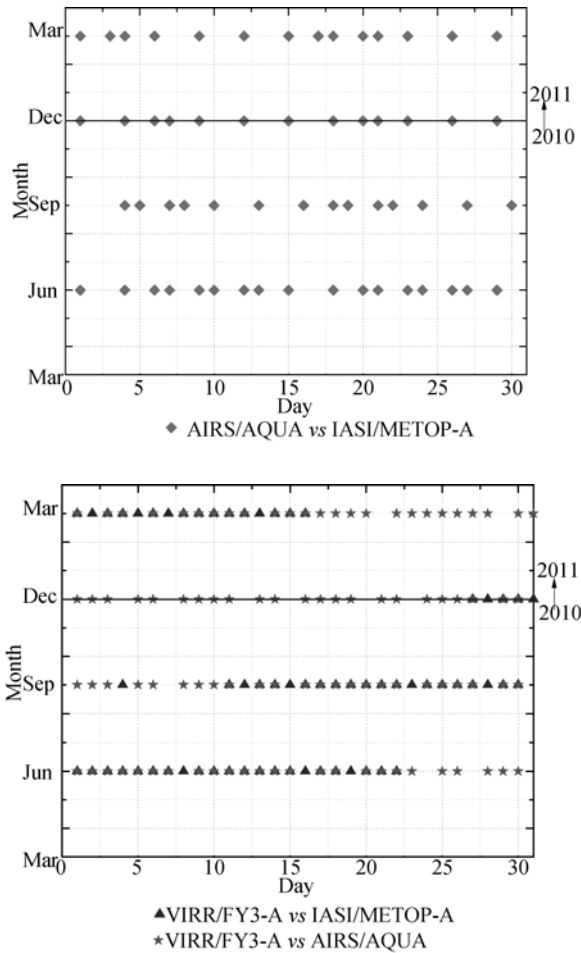


图 6 传感器匹配观测点对的过境日期

Fig. 6 Temporal distributions of matching points from sensors

4.2 交叉辐射定标结果

4.2.1 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 的定标比较

为了验证交叉辐射定标的可靠性和有效性,以 VIRR/FY-3A 第 4 和第 5 波段为参考,首先对卷积后的 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 进行比对,匹配条件是同地点、观测时间差绝对值小于 5 min ($|\Delta T| < 5 \text{ min}$) 且 $|\cos\theta_1/\cos\theta_2 - 1| < 0.015$ (θ_1 和 θ_2 分别为 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 传感器的观测天顶角)。图 7 所示为

第 4 波段和第 5 波段的匹配点对和线性拟合结果。X 坐标是卷积后的 IASI/METOP-A 亮度温度, Y 坐标是卷积后的 AIRS/AQUA 亮度温度。黑点代表 2010 年 6 月,红点代表 2010 年 9 月,绿点代表 2010 年 12 月,蓝点代表 2011 年 3 月(彩图见期刊电子版)。

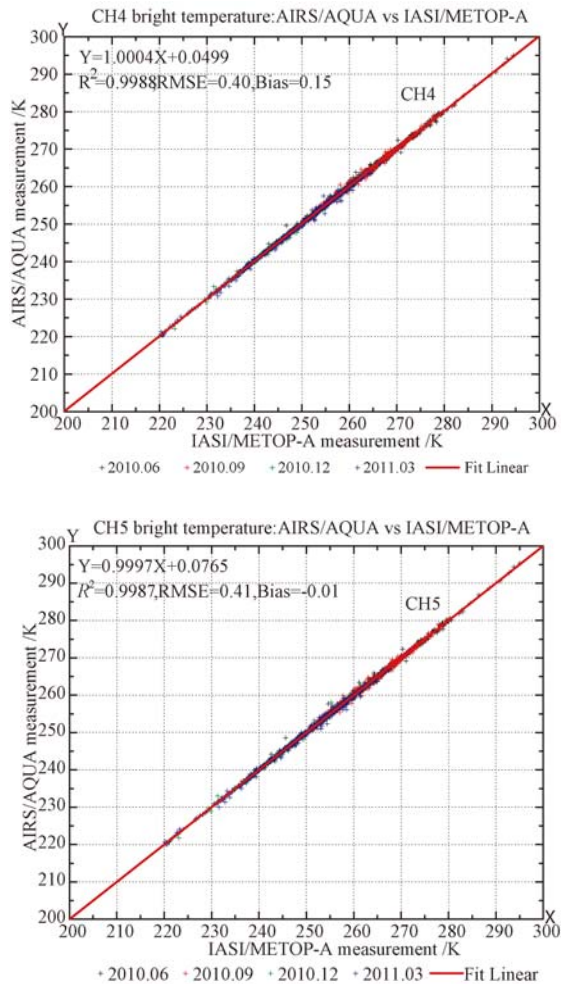


图 7 高光谱传感器 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 分别卷积到 VIRR/FY-3A 的两个分裂窗波段上的辐射定标结果

Fig. 7 Result of cross-calibration between AIRS/AQUA and IASI/METOP-A (the hyperspectral sensors both convolved with VIRR/FY-3A split-window channels)

对于第 4 波段和第 5 波段,卷积后的 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 数据拟合相关性 R^2 均大于 0.998,均方根误差 RMSE 约为 0.4 K,偏差 Bias 分别是 0.15 K 和 -0.01 K,辐射定标的结果基本一致。

4.2.2 AIRS/AQUA 和 VIRR/FY-3A 的比较

相对于 AIRS/AQUA 高光谱数据,图 8 所示为 VIRR/FY-3A 第 4 和第 5 波段交叉辐射定标结果。X 坐标是 VIRR/FY-3A 亮度温度,Y 坐标是卷积的 AIRS/AQUA 亮度温度。黑点、红点、绿点、蓝点分别表示 2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月(彩图见期刊电子版)。实线为线性拟合结果。

图 8(a)显示,对于 VIRR/FY-3A 第 4 波段,2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月的观测匹配点对的亮度温度分别为[240 K,280 K]、[235 K,280 K]、[215 K,260 K]和[210 K,265 K]。当对 4 个月份的匹配观测点对分别拟合时,发现重叠区间[235 K,260 K]亮度温度偏差较大。其中对比 2010 年 6 月和 2010 年 12 月的数据:当亮度温度为 235 K 时,6 月亮度温度高于 12 月亮度温度,偏差达到 1.1 K;随着亮度温度的升高,当亮度温度为 260 K 时,最大偏差为 1.5 K。观察 2010 年 9 月和 2011 年 3 月的匹配观测点对:2010 年 9 月基本比 2010 年 6 月的亮度温度约低 0.9 K,而与 2010 年 12 月的亮度温度偏差约为 0.2~0.5 K,说明 2010 年 9 月的亮度温度变化与 12 月更接近;2011 年 3 月与 2010 年 12 月的亮度温度偏差约为 0.1~0.3 K,更接近于 2010 年 12 月。因此将 2010 年 6 月、其他 3 个月分别回归拟合。根据卫星和太阳的位置关系,在 2010 年 6 月所有的匹配观测点卫星都被太阳照射,而在 2010 年 9 月、12 月和 2011 年 3 月的匹配点卫星被太阳照射和没有被太阳照射两种状态都有出现;在同一月份内,定标几乎一致。因此定标差异不是由于太阳与卫星的位置关系造成,而是与季节变

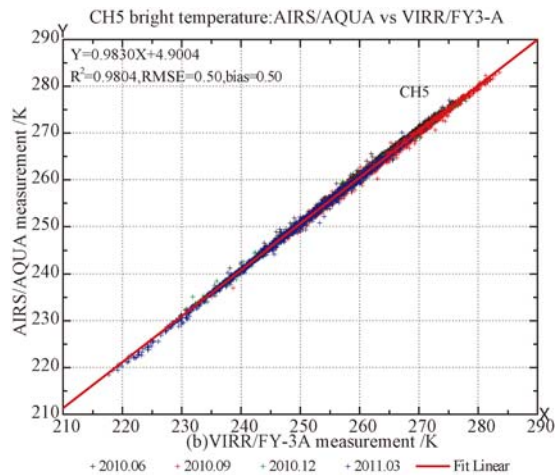
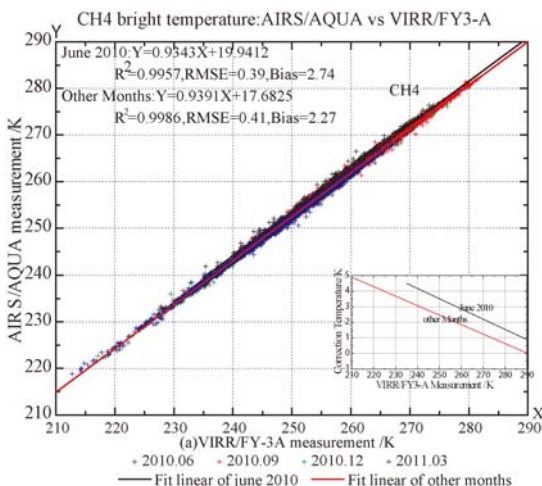


图 8 卷积的 AIRS/AQUA 数据与 VIRR/FY-3A 的分裂窗波段交叉辐射定标的结果及方程,其中 R^2 是拟合相关性系数, RMSE 是均方根误差, Bias 是亮度温度平均偏差(时间:2010 年到 2011 年)

Fig. 8 Cross-calibration result of VIRR/FY-3A split-window channels with convoluted AIRS/AQUA data (from 2010 to 2011)

化有关,即与亮度温度有关。

图 8(b)显示,对于 VIRR/FY-3A 第 5 波段,2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月的观测匹配点对的亮度温度分别为[235 K,285 K]、[230 K,285 K]、[220 K,270 K]和[215 K,275 K]。当对 4 个月份的匹配观测点对分别拟合时,不同月份定标后亮度温度偏差不明显,为 0.1 K~0.5 K,因此将所有的观测匹配点对进行拟合。

最终得到卷积重采样的 AIRS/AQUA 图像与 VIRR/FY-3A 图像方程系数如表 1 所示。

表 1 AIRS/AQUA 和 VIRR/FY-3A 的方程系数

Tab. 1 Coefficients between AIRS/AQUA and VIRR/FY-3A

通道	斜率	截距	R^2	RMSE
CH4				
2010 年 6 月	0.934 3	19.941 2	0.995 7	0.39
其他月份	0.939 1	17.682 5	0.998 6	0.41
CH5	0.983 0	4.900 4	0.980 4	0.50

4.2.3 IASI/METOP-A 和 VIRR/FY-3A 的比较

相对于 IASI/METOP-A 高光谱数据,图 9 所示为 VIRR/FY-3A 第 4 和第 5 波段的交叉辐射定标结果。X 坐标是 VIRR/FY-3A 第 4 或第

5 波段亮度温度, Y 坐标是卷积后的 IASI/METOP-A 亮度温度。黑点、红点、绿点、蓝点分别表示 2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月(彩图见期刊电子版)。实线是线性拟合结果。

图 9(a) 显示, 对于 VIRR/FY-3A 第 4 波段, 2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月的观测匹配点对的亮度温度分别为 [230 K, 285 K]、[215 K, 285 K]、[220 K, 265 K] 和 [210 K, 265 K]。当对 4 个月份的匹配观测点对分别拟合时, 发现重叠区间 [230 K, 265 K] 亮度温度偏差较大。对比 2010 年 6 月和 2010 年 12 月的数据: 6 月亮度温度高于 12 月亮度温度, 当亮度温度为 245 K 时, 亮度温度偏差为 1.1 K; 随着亮度温度的升高, 当亮度温度为 265 K 时, 亮度温度偏差最大为 1.9 K。观察 2010 年 9 月和 2011 年 3 月的匹配观测点对: 2010 年 9 月比 2010 年 6 月的亮度温度约低 0.8 K, 而与 2010 年 12 月的亮度温度偏差小于 0.6 K, 说明 2010 年 9 月亮度温度值更接近于 2010 年 12 月; 2011 年 3 月与 2010 年 12 月的亮度温度偏差约为 0.1~0.3 K, 也更接近 2010 年 12 月。因此将 2010 年 6 月、其他 3 个月份分别回归拟合得到。根据卫星和太阳的位置关系, 在 2010 年 6 月所有的匹配观测点卫星都被太阳照射, 而在 2010 年 9 月、12 月和 2011 年 3 月的匹配点卫星被太阳照射和没有被太阳照射两种状态都有出现; 在同一月份内, 定标几乎一致。因此定标差异不是由于太阳与卫星的位置关系造成, 而是与季节变化有关。这与 AIRS/AQUA 的定标情况相同。

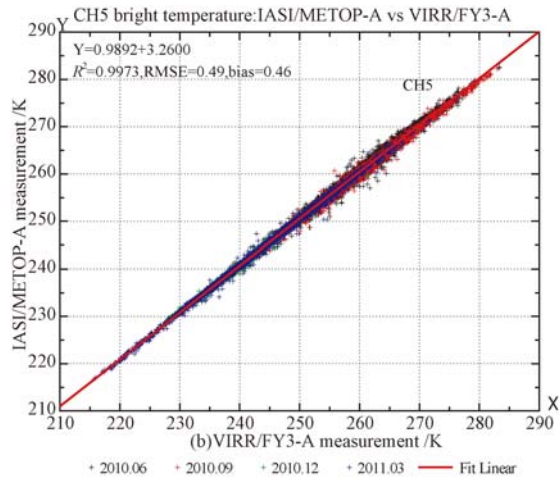
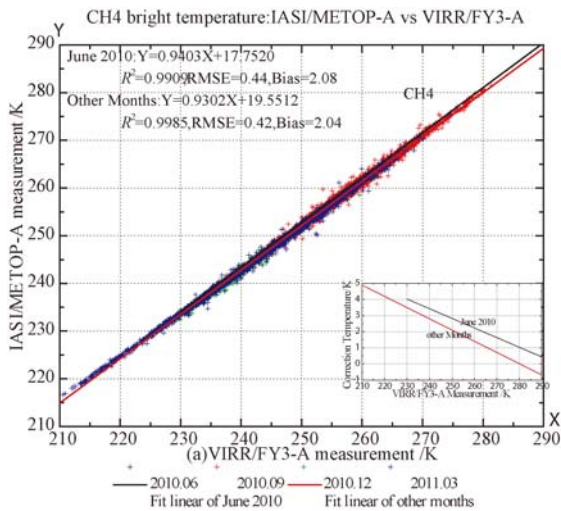


图 9 卷积的 IASI/METOP-A 数据与 VIRR/FY-3A 的分裂窗波段交叉辐射定标结果及方程, 其中 R^2 是拟合相关性系数, RMSE 是均方根误差, Bias 是亮度温度平均偏差(时间: 2010 年到 2011 年)

Fig. 9 Result of cross-calibration of VIRR/FY-3A split-window channels with convoluted IASI/METOP-A data (time: From 2010 to 2011)

图 9(b) 显示, 对于 VIRR/FY-3A 第 5 波段, 2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月的观测匹配点对的亮度温度分别为 [230 K, 285 K]、[220 K, 280 K]、[220 K, 270 K] 和 [215 K, 270 K]。当对每个月的匹配观测点对分别拟合时, 不同月份定标后亮度温度偏差均小于 0.5 K, 因此将所有匹配观测点进行拟合。

最终得到卷积后的 IASI/METOP-A 图像与 VIRR/FY-3A 图像系数如表 2 所示。

表 2 IASI/METOP-A 和 VIRR/FY-3A 的系数

Tab. 2 Coefficients between IASI/METOP-A and VIRR/FY-3A

通道	斜率	截距	R^2	RMSE
CH4:				
2010 年 6 月	0.940 3	17.752 0	0.990 9	0.44
其他月份	0.930 2	19.551 2	0.998 5	0.42
CH5	0.989 2	3.260 0	0.997 3	0.49

4.3 定标分析

相对于 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 传感器, 图 10 给出了 VIRR/FY-3A 第 4 波段和第 5 波段的定标误差随月份的变化。X 坐标是月

份, Y 坐标是亮度温度平均偏差。曲线点表示每个月的平均偏差, 每个月的均方根误差作为误差棒。AIRS/AQUA 和 VIRR/FY-3A 的定标中, 第 4 波段的偏差约为 2~3 K, 以不超过 0.5 K 的较小幅度波动; 第 5 波段的偏差基本在 0~1 K 以内, 以不超过 0.5 K 的较小幅度波动。IASI/METOP-A 与 VIRR/FY-3A 的定标中, 第 4 波段的偏差基本在 1.5~3 K 以内以不超过 0.5 K 的较小幅度波动; 第 5 波段的偏差基本在 0~1 K 以内以不超过 0.5 K 的较小幅度波动。以上结果说明, VIRR/FY-3A 分裂窗波段分别相对于 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 的定标结果基本一致, 印证了 4.2 所给出的结论。相对而言, 第 5 波段的定标精度要好于第 4 波段的定标精度。

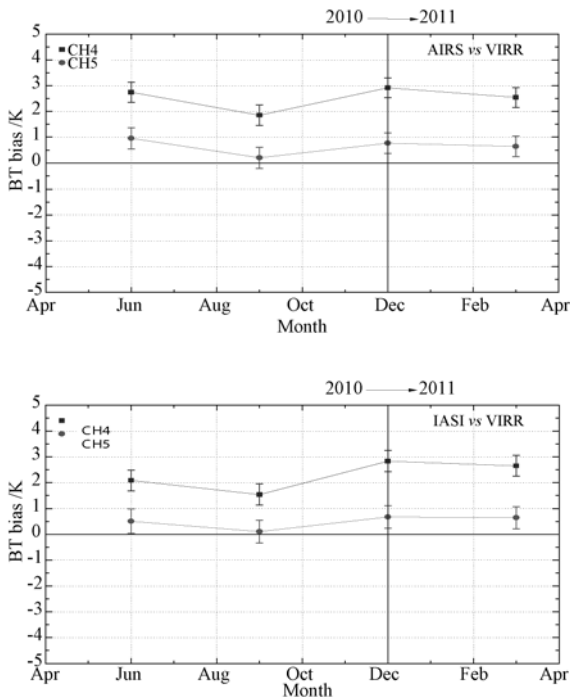


图 10 每个月的平均定标偏差

Fig. 10 Monthly brightness temperature average bias

根据表 1 和表 2 的方程, 计算调整后 VIRR/FY-3A 的第 4 波段和第 5 波段的亮度温度。图 11 给出了交叉辐射定标前亮度温度偏差和根据计算后的亮度温度偏差的直方统计图。

以 AIRS/AQUA 交叉辐射定标为标准, VIRR/FY-3A 第 4 波段亮度温度偏差平均值为 2.39 K, 第 5 波段亮度温度偏差为 0.59 K。以

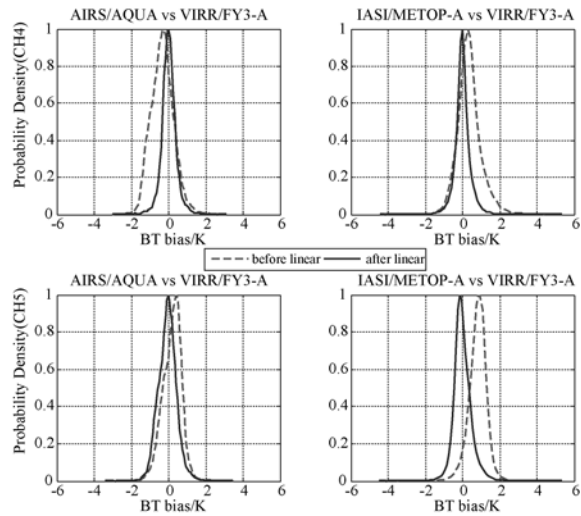


图 11 定标前后的亮度温度偏差直方统计图

Fig. 11 Histogram of brightness temperature bias, including original and after calibration

IASI/METOP-A 辐射定标为标准, VIRR/FY-3A 第 4 波段亮度温度偏差平均值为 2.06 K, 第 5 波段亮度温度偏差平均值为 0.44 K。由此可见, 相对于 AIRS/AQUA 和 IASI/METOP-A 数据, VIRR/FY-3A 第 4 波段和第 5 波段的交叉辐射定标结果基本一致。

5 结 论

本文根据高光谱卷积法, 选择北极地区 (60° N~90° N, 180° W~180° E) 为研究区域, 用 2010 年 6 月、9 月、12 月和 2011 年 3 月的 AIRS/AQUA 1B 红外数据、IASI/METOP-A 1C 数据和 VIRR/FY-3A L1 数据对 VIRR/FY-3A 第 4 波段和第 5 波段进行交叉辐射定标, 给出了的斜率和截距, 解决了 VIRR/FY-3A 在轨辐射定标的不精确问题。

研究表明: 相对于 AIRS/AQUA 波段, VIRR/FY-3A 第 4 波段平均亮度温度偏差为 2.39 K, VIRR/FY-3A 第 5 波段平均亮度温度偏差为 0.59 K, 且定标的精度不仅和季节相关, 定标的偏差还与亮度温度有关, 也与传感器波段特性有关, 即第 5 波段的精度好于第 4 波段。本文研究结果为从 VIRR/FY-3A 红外数据精确反演地表和海表温度奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李家国, 顾行发, 余涛, 等. 热红外双通道差分模型交叉定标[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(7): 771-779.
LI J G, GU X F, YU T, *et al.*. Cross-calibration of infrared double channels difference model[J]. *Science in China: Technology Science*, 2012, 42(7): 771-779. (in Chinese)
- [2] 李元, 戎志国, 郑照军, 等. FY-3A 扫描辐射计可见近红外通道在轨场地定标[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2966-2974.
LI Y, RONG ZH G, ZHENG ZH, *et al.*. Post launch site calibration of the visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2966-2974. (in Chinese)
- [3] 顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
GU X, TIAN G L, YU T, *et al.*. *Space optical remote sensor radiometric calibration principles and methods* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 漆成莉, 胡秀清, 张里阳, 等. 基于高光谱资料对 FY-1C/1D 气象卫星进行交叉定标[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 892-901.
QI CH L, HU X Q, ZHANG L Y, *et al.*. Cross-calibration of FY-1C/1D satellite based on hyperspectral data[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 892-901. (in Chinese)
- [5] 徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. FY-2 静止卫星红外通道的高光谱交叉定标[J]. 遥感学报, 2012, 16(5): 939-952.
XU N, HU X Q, CHEN L, *et al.*. Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR using high-spectral resolution sensors IASI and AIRS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5): 939-952. (in Chinese)
- [6] HU XQ, XU N, WENG F ZH, *et al.*. Long term monitoring and correction of FY-2 infrared channel calibration using AIRS and IASI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(10): 2008-5018.
- [7] XU N, CHEN L, HU X Q, *et al.*. Assessment and correction of on-orbit radiometric calibration for FY-3 VIRR thermal infrared channels[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6, 2884-2897.
- [8] 胡秀清, 张里阳, 郑照军, 等. FY-3A 中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1978-1986.
HU X Q, ZHANG L Y, ZHENG ZH J, *et al.*. Multi-detector radiometric calibration for infrared band of medium resolution spectral imager onboard FY-3A[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1978-1986. (in Chinese)
- [9] 风云三号卫星有效载荷及数据产品介绍[S]. 2007. 国家气象卫星中心.
Introduction of payloads carried on FY3 satellite and data products[S]. *National Satellite Meteorological Centre*, 2007. (in Chinese)
- [10] JIANG G M, ZHOU W, LIU R G. Development of Split-Window Algorithm for Land Surface Temperature Estimation From the VIRR/FY-3A Measurements[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2013, 10(4): 952-956.
- [11] JIANG G M, ZHOU W. Comparison of the in-orbit calibrations between the microwave sounders on NOAA and FY-3 satellites[C]. IGARSS, 2013, 398-401.
- [12] JIANG G M. Intercalibration of infrared channels of polar-orbiting IRAS/FY-3A with AIRS/Aqua data[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3358-3363.
- [13] 张勇, 顾行发, 余涛, 等. CBERS-02 卫星 IRMSS 传感器热红外通道综合辐射定标[J]. 中国科学: 信息科学, 2005, 35: 70-88.
ZHANG Y, GU X F, YU T. Calibration of CBERS-02/IRMSS Infrared channels[J]. *Science in China Ser. E Information Science*, 2005, 35: 70-88. (in Chinese)
- [14] 蒋耿明, 金亚秋. 中国风云二号 SVISSR 传感器热红外波段与 AIRS/Aqua 的交叉辐射定标[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(4): 504-510.
JIANG G G, JIN Y Q. Intercalibration of SCIRR/FY-2 thermal infrared channels with AIRS/Aqua channels[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(4): 504-510. (in Chinese)

作者简介:



周蔚(1990—), 女, 浙江瑞安人, 2012 年于华东师范大学获得学士学位, 主要从事温度反演与交叉辐射定标方面的研究。E-mail: wei_zh0916@gmail.com, zhou-wei@hotmail.com



蒋耿明(1975—), 男, 湖南省永州人, 博士, 副教授, 1997 年于武汉测绘科技大学获得学士学位, 2000 年于中国科学院遥感应用研究所获得硕士学位, 2007 年于法国斯特拉斯堡第一大学获得博士学位, 主要从事定量遥感的教学和科研工作。E-mail: jianggm@fudan.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)