

文章编号:1001-9014(2009)01-0054-04

全天空红外测云系统辐射传感器的替代定标

孙学金^{1,2}, 刘剑², 毛节泰¹

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871; 2. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 为了实现全天空红外测云系统辐射传感器业务运行过程中的定标, 提出了一种以晴空辐射为标准辐射场的替代定标方法. 根据 SBDART 辐射传输模式计算出的晴空大气向下红外辐射以及辐射传感器对天空观测的输出量化值, 利用线性回归方法确定出传感器全场各像元的响应率和偏移量. 定标结果分析表明, 响应率不确定度为 2.03 DN unit/(W · m⁻² · sr⁻¹), 偏移量具有明显的正态分布特征, 为空间随机噪声. 标准黑体检验表明温度反演平均误差不超过 ±1.5℃, 能够满足系统量化应用的要求.

关键词: 大气遥感; 云; 替代定标; 全天空红外测云系统; 向下红外辐射

中图分类号: P407.6 **文献标识码:** A

VICARIOUS CALIBRATION ON THE SENSOR OF WHOLE SKY INFRARED CLOUD MEASURING SYSTEM

SUN Xue-Jin^{1,2}, LIU Jian², MAO Jie-Tai¹

(1. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: In order to calibrate the sensor of whole sky infrared cloud measuring system (WSIRCMS) in operational period, a vicarious calibration method was proposed based on the clear sky infrared radiance field. The response rates and the offsets of the whole array were obtained by linear regression method on the basis of the clear sky infrared radiance modeled by SBDART, and the DN values were observed. Our results show that the uncertainty of the response rates is 2.03 DN unit/(W · m⁻² · sr⁻¹), and the offsets have a character of normal distribution which can be considered as spatial random noise. The average error of temperature retrieved is within ±1.5℃ according to the validation of the blackbody test data, which can satisfy the quantitative applications of WSIRCMS.

Key words: atmospheric remote sensing; cloud; vicarious calibration; whole sky infrared cloud measuring system (WSIRCMS); downward infrared radiance

引言

云通常覆盖地球表面约 50% 左右, 为了研究其对气候变化的影响, 对量化的云观测资料的需求日益迫切^[1]. 此外, 云的连续观测是灾害性天气监测、预报的重要手段. 但是目前地面测云仍以人工目测为主, 自动化、量化程度很低. 我们最近研制的全天空红外测云系统利用大气向下红外辐射进行全天空云的遥感, 实现了昼夜连续自动化定量测云. 辐射传感器作为该系统的核心部件, 其定标精度直接影响反演结果的准确度. 辐射传感器定标是遥感信息量化应用的基础性和关键性问题^[2]. 在卫星遥感中, 传感器在卫星发射后, 由于发射影响、工作环

境变化、传感器老化等问题, 定标关系会偏离发射前试验室的定标结果, 必须进行在轨定标. 交叉定标^[3]和替代定标是进行在轨定标的重要手段^[4]. K. Thome 和 N. Smith (2001) 利用美国内华达州的 Railroad Valley Playa 辐射校正场对 MODIS 传感器进行了替代定标^[5]. 戎志国等人 (2007) 利用南海海面水体辐射分别对 FY-2B 与 FY-2C 红外通道进行了替代定标^[6]. 在地基遥感中, 辐射传感器同样存在运行后定标关系变化的问题, 本文提出的利用晴空作为标准辐射场的替代定标方法, 实现了全天空红外测云系统业务运行过程中的绝对辐射定标.

1 全天空红外测云系统简介

收稿日期: 2008-02-21, 修回日期: 2008-06-18

Received date: 2008-02-21, revised date: 2008-06-18

作者简介: 孙学金 (1964-), 男, 江苏海安人, 解放军理工大学气象学院教授, 硕士, 主要研究方向为大气辐射与遥感.

全天空红外测云系统由光学测量、扫描伺服、环境参数测量、采集控制以及数据处理等单元组成. 光学测量单元在采集控制单元的控制下由扫描伺服单元驱动实现对全天空红外辐射的测量. 数据处理单元对采集的红外辐射信号进行定标、大气修正和云识别处理,生成云分布、云量、云高等产品. 光学测量单元的辐射传感器主要由 320×240 像元的非致冷红外焦平面阵列 (UIRFPA)、大口径红外物镜以及内定标黑体构成. 安置有温度传感器测量焦平面阵列工作温度. 内定标黑体采用无遮挡金属黑体腔,为辐射测量提供单点校正. 发射系数大于 0.98,腔内埋有温度传感器.

2 替代定标模型

全天空红外测云系统运行之前,利用可控温腔式黑体源在可控温环境中对辐射传感器进行了严格的实验室定标. 定标结果表明,传感器的辐射定标模型如式(1)所示:

$$DN_i(i,j) = K_1(i,j) \cdot L_i(i,j) + K_2(i,j) \cdot L_{dec} + C(i,j) \quad (1)$$

式中, DN_i 为对目标采样时的传感器输出计数值, K_1 为传感器响应率, L_i 为目标积分辐射率, K_2 为UIRFPA工作温度影响因子, L_{dec} 为UIRFPA工作温度对应的积分辐射率, C 为偏移量.

替代定标过程中,分别对天空和内定标黑体采样,于是:

$$DN_{sky}(i,j) = K_1(i,j) \cdot L_{sky}(i,j) + K_2(i,j) \cdot L_{dec} + C(i,j) \quad (2)$$

$$DN_{bb}(i,j) = K_1(i,j) \cdot L_{bb}(i,j) + K_2(i,j) \cdot L_{dec} + C(i,j) \quad (3)$$

式中, DN_{sky} 为对天空采样时传感器输出的计数值, DN_{bb} 为对内定标黑体采样时传感器的输出计数值, L_{sky} 为大气向下红外辐射, L_{bb} 为内定标黑体出射辐射率. 令 $\Delta DN(i,j) = DN_{sky}(i,j) - DN_{bb}(i,j)$, $\Delta L(i,j) = L_{sky}(i,j) - L_{bb}(i,j)$. 替代定标过程中,UIRFPA工作温度几乎不变,将式(2)减去式(3),即单点定标处理后,得到替代定标模型:

$$\Delta DN(i,j) = K_1(i,j) \Delta L(i,j) + \varepsilon(i,j) \quad (4)$$

式中,偏移量 $\varepsilon(i,j)$ 为UIRFPA的空间噪声. 在单点定标处理之后,UIRFPA的暗电流噪声、固定模式噪声(FPN)已得到修正. 剩余的主要噪声为读出噪声、光子噪声、 $1/f$ 噪声等,这些噪声的合成总噪声为零均值的正态分布^[7].

在替代定标过程中, L_{sky} 采用SBDART辐射传输模式计算. 辐射测量与模式计算结果比较表明,在晴

空条件下,SBDART模式计算出的积分辐射率不确定度为3%^[8],其计算结果可作为替代定标的标准天空辐射.

3 替代定标试验结果与分析

3.1 试验数据

替代定标试验于2007年1月6日至10日期间在南京进行. 试验过程中对内定标黑体温度、UIRFPA工作温度、天空观测计数值、内定标黑体观测计数值进行采样,并同步观测云量、天气现象和能见度. 由于每日只有7:00、19:00BST探空资料,因此试验在每日06:30~07:30,18:30~19:30两个时间段间隔30分钟进行. 试验结束后,选取晴空样本8例. 其中,8日19:00及9日19:00天空均有少量的云,因此分别用8日19:30及9日19:30时次的观测结果代替. 人工观测的能见度值在3~7km. 将探空资料以及实测能见度作为SBDART的输入参数,计算天空辐射. 模型的其他主要参数设置如下:(1)无云;(2)为城市气溶胶型;(3)响应波段为8~14 μm .

3.2 单点定标结果分析

利用内定标黑体温度计算内定标黑体出射积分辐射率 L_{bb} ,并计算 L_{bb} 与 L_{sky} 之差 ΔL 以及 DN_{bb} 与 DN_{sky} 之差 ΔDN . 利用线性回归得到UIRFPA各像元的定标关系. 在UIRFPA上选取位置为(120,160)、(120,80)、(120,240)、(60,160)、(180,160)的5个像素点分析单点定标结果. 限于篇幅,图1中仅给出了中心像元(120,160)上 ΔL 与 ΔDN 的散点图(上图)和拟合误差(下图),上图中直线为拟合曲线,圆圈为替代定标数据. 可以看出: ΔL 与 ΔDN 之间的线性关系明显,表明在该像元上定标模型式(4)成立. 不同定标点的拟合误差有正有负,误差绝对值最大不超过60DN unit. 其他像元也有类似结果. 将五个像元的线性拟合结果列于表1,可以看出:在五个像元点上,响应率变化不大但偏移量变化较大,拟合残差标准差全部小于39DN值,噪声等效辐射NER小于 $0.53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

3.3 全场定标结果分析

为了分析探测器全场定标结果,将UIRFPA全场响应率与偏移量分别绘于图2和图3中.

从图2可以看出:(1)响应率明显呈现以中心为极大值的对称分布;(2)响应率空间分布存在起伏变化. 图3中黑色点划线为标准差为50.8419DN unit,中心在7.1146DN unit的正态分布曲线,黑色竖线为偏移量的空间分布直方图,二者非

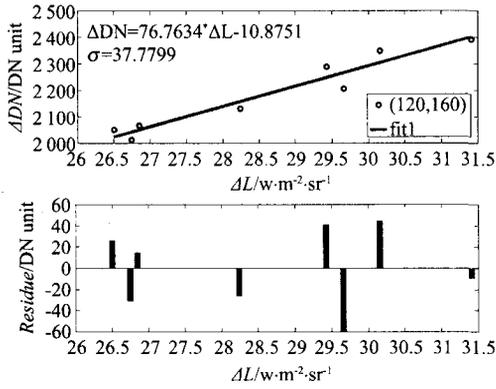


图1 (120,160)点定标数据线性回归
Fig. 1 Linear regression of calibration data at (120,160)

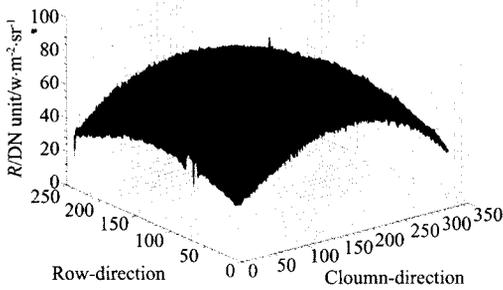


图2 响应率空间分布
Fig. 2 Space distribution of response rate

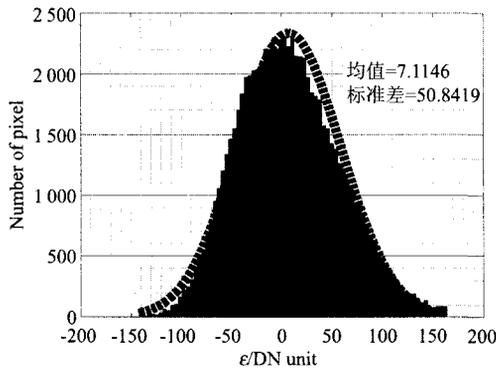


图3 UIRFPA 空间噪声分布
Fig. 3 Distribution of UIRFPA spatial noise

常一致. 说明偏移量空间分布为正态分布, 中心位置

为 7.1146DN unit, 接近于 0, 与前文的理论分析结果吻合. 忽略空间噪声引起的偏移量后, 由定标模型式 (4) 可得到响应率的计算公式 (5) 以及天空辐射的反算公式 (6):

$$K_1 = \frac{\Delta DN}{L_{sky} - L_{bb}} \quad (5)$$

$$L_{sky}(i,j) = \frac{DN_{sky}(i,j) - DN_{bb}(i,j)}{K_1(i,j)} + L_{bb}(i,j) \quad (6)$$

3.4 响应率不确定度分析

假设公式 (5) 中各参量不相关, 根据不确定度合成方法, 响应率 K_1 的合成不确定度为:

$$u(K_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_1}{\partial \Delta DN}\right)^2 u^2(\Delta DN) + \left(\frac{\partial K_1}{\partial L_{bb}}\right)^2 u^2(L_{bb}) + \left(\frac{\partial K_1}{\partial L_{sky}}\right)^2 u^2(L_{sky})} \quad (7)$$

表 2 列出各误差源的不确定度以及对响应率合成不确定度的贡献. ΔDN 的标准不确定度由上文计算出的 UIRFPA 空间噪声给出, 该项对合成不确定度的贡献是三个误差源中最大的, 在下一步定标中应采用 N 幅图像平均的方法将影响因子减少 \sqrt{N} 倍; 内定标黑体出射积分辐射率 L_{bb} 的标准不确定度, 由测温误差及比辐射率误差合成得到, 经计算该项为 $0.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 影响因子为 $1.15 \text{ DN unit}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})^2$, 对合成不确定度的贡献较小, 说明内定标黑体单元能够满足系统应用的需要; 大气向下红外辐射 L_{sky} 计算的不确定度, 采用 B 类不确定度评定方法确定. 根据相关文献 [8], SBDART 计算晴空大气向下红外辐射率的不确定度为 3%. 考虑到替代定标过程中探空资料时空不匹配以及气溶胶粒子性质无法确定等因素, 取置信概率为 95%、自由度为无穷大, 此时扩展不确定度包含因子为 1.96, 在这种情况下估计入瞳辐射率 L_{sky} 计算误差为 6%, 标准不确定度为 $0.53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 则该项的影响因子为 $1.20 \text{ DN unit}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})^2$. 响应率的合成不确定度为 $2.03 \text{ DN unit}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$.

4 替代定标验证

为检验替代定标结果的准确性, 将全天空红外

表 1 单个像元定标结果
Table 1 Calibration results of single pixel

线性拟合	Pixel 1 (120,160)	Pixel 2 (120,80)	Pixel 3 (120,240)	Pixel 4 (60,160)	Pixel 5 (180,160)
响应率/DN unit/(W · m ⁻² · sr ⁻¹)	76.7634	71.5512	69.8220	73.4973	73.9097
偏移量/DN unit	-10.8754	-28.0253	15.1326	-10.3593	-6.6240
残差标准差/DN unit	37.7799	31.6952	34.5503	38.7989	35.8482
NER/W · m ⁻² · sr ⁻¹	0.4922	0.4430	0.4948	0.5279	0.4850

表 2 响应率不确定度评定
Table 2 Appraisal of the uncertainty of response rate

参数	不确定度评定类型	全场均值	标准不确定度	相对不确定度	影响因子
ΔDN	A	1776 DN unit	50 DN unit	2.81%	$1.78(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})^{-1}$
L_{bb}	B	$36.89 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$0.51 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	1.38%	$1.15 DN unit / (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})^2$
L_{sky}	B	$8.86 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$0.53 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	6%	$1.20 DN unit / (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})^2$
K_1	合成不确定度	$63.51 DN unit (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$	$2.03 DN unit / (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$	3.20%	

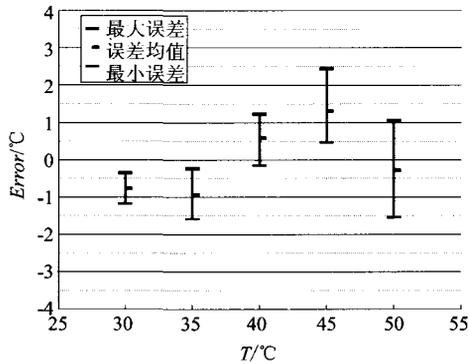


图 4 标准黑体温度反算误差

Fig. 4 Errors of retrieved blackbody temperature

测云系统对标准黑体进行采样测量。

2006 年 10 月在南京进行了定标实验,当时室温较高,为防止黑体表面结露,只对 30℃、35℃、40℃、45℃、50℃ 五个温度点进行了试验。黑体源孔径较小,无法覆盖传感器的整个视场,故只选取传感器中心 20 像元 × 20 像元的区域进行验证。图 4 给出了各个温度点反演温度平均误差和误差范围。从图中可以看出:在选取的区域内,平均误差在 ±1.5℃ 之内,所有误差在 ±2.5℃ 之内。根据平均误差得到相对误差在 ±3% 之内。

5 结语

本文提出了一种利用晴空作为标准辐射场对全天空红外测云系统辐射传感器进行替代定标的方法,得到了定标关系式和响应率,响应率的合成不确定度为 $2.03 DN unit / (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$, 温度反演平均误差在 ±1.5℃ 之内,可以满足全天空红外测云系统辐射定标要求,为全天空红外测云系统的运行过程中定标提供了一种简单有效的方法。根据上文讨论,可从下述两方面进一步提高替代定标精度:(1) 在定标过程中对目标多次采样取均值,以减小 UIR-FPA 空间噪声引入的不确定度;(2) 在高能见度晴

空条件下进行替代定标,以减少气溶胶的影响,并获取时空同步的探空资料,提高大气向下红外辐射的计算精度。

REFERENCES

- [1] DING Shou-Guo, SHI Guang-Yu, ZHAO Chun-Sheng. Analysis of different cloud cover and type transformation in recent 20 years and its possible impacts on the climate using ISCCP D2 data[J]. *Chinese Science Bulletin* (丁守国, 石广玉, 赵春生. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响. *科学通报*), 2004, **49**(11): 1105—1111.
- [2] GU Xing-Fa, TIAN Guo-Liang, LI Xiao-Wen, et al. Remote sensing information rationalization[J]. *Science in China (Series E)* (顾行发, 田国良, 李小文, 等. 遥感信息的量化. *中国科学 E 辑信息科学*), 2005, **35**(增 I): 1—10.
- [3] PENG Guang-Xiong, HE Yu-Hua, LI Jing, et al. Study on CBERS-2's CCD image cross calibration and atmospheric correction[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴地球资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 22—25.
- [4] Butler J J, Barnes R A. Calibration strategy for the Earth Observing System (EOS)-AM1 Platform[J]. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 1998, **36**(4): 1056—1061.
- [5] Thome K, Smith N. Vicarious calibration of MODIS using Railroad Valley Playa[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International*, 2001, **3**: 1209—1211.
- [6] 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.
- [7] Healey G E, Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation[J]. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 1994, **16**(3): 267—276.
- [8] Philipona R, Dutton E G, Stoffel T, et al. Atmospheric longwave irradiance uncertainty: Pyrgometers compared to an absolute sky-scanning radiometer, atmospheric emitted radiance interferometer, and radiative transfer model calculations[J]. *Journal of geophysical research*, 2001, **106**(22): 129—141.