

文章编号: 1000-7032(2010)05-0676-06

太阳辐射的在轨监测和定标

杨东军^{1,2}, 方伟^{1*}, 邱红³, 齐瑾³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 采用宽视场设计, 逐轨扫描太阳式测量方式的 FY-3A 太阳辐射监测仪, 结合在轨一年半的太阳辐射度观测数据和地面实验与理论分析, 研究了影响定标精度的因素, 给出了修正方程和曲线, 并通过与世界辐射基准 (WRR) 的地面外场定标实验, 得到了 FY-3A 上的三台绝对辐射计的比例系数 $R_1 = 1.0083$, $R_2 = 1.0066$ 和 $R_3 = 1.0065$ 。日地距离的理论分析和实际太阳辐射度测量曲线均证明: 地球近日点太阳辐射度值最大, 远日点太阳辐射度值最小, 且在 $\pm 3.34\%$ 范围内随日期变化。利用天文公式, 结合遥感源包中的准确测量时间, 给出了日、地修正系数。另外, 分析了冷空间背景辐射对定标精度的影响, 给出了冷空间辐射值的计算公式, 并结合宽视场设计和扫描式测量的特点, 重点分析了采光结束时刻和刚捕获太阳光时刻入射角的差异给辐射度测量带来的影响, 通过几何关系给出了入射角修正系数方程及修正曲线。最后, 综合各定标修正系数, 给出了在轨定标方程和定标曲线, 并分析了定标精度。

关键词: 太阳辐射监测; 入射角; 在轨定标

中图分类号: P182.2

PACS: 96.60.Ub

PACC: 9660T

文献标识码: A

1 引 言

太阳辐射是地球上除了核能、地热、火山爆发等之外最重要的外部能源, 它的微小变化将影响地球辐射量改变与地球的温度平衡, 最终将导致全球范围内能量、水、碳和氮循环过程的变动, 引起地球环境和气候的变化^[1]。利用风云三号卫星搭载的 FY-3A 太阳辐射监测仪, 在 $0.2 \sim 50 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 通过其上有效吸收率超过 99.97% 的腔型黑体接收器, 实现了太阳辐射总量变化的监测。这将为环境变化监测、气候预报和全球气候变化预报研究提供重要参考数据。

FY-3A 太阳辐射监测仪由按一定倾角平行排列的三台相同绝对辐射计组成。如图 1, 每台辐射计均采用了宽视场角设计, 因此可保证三台绝对辐射计在全年每一天都有太阳光进入视场^[2]。

该太阳辐射监测仪在每轨进入光照区后, 通过宽视场辐射计扫描天空。当有阳光进入视场时开始测量辐照度, 这种测量方式称为太阳扫描式

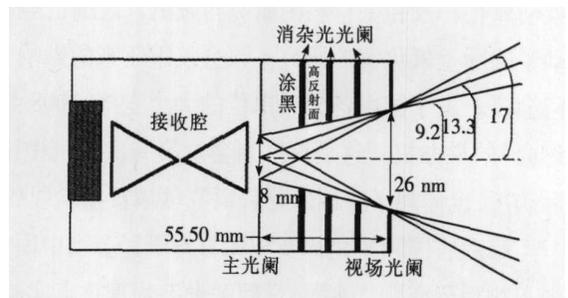


图 1 辐射计视场角

Fig. 1 Angle of view in field of the radiator

测量。太阳扫描式测量相对于太阳跟踪式测量, 优点是系统结构简单, 不需要增加转台跟踪系统, 成本低, 可靠性高, 但没有太阳跟踪式测量定标简单。宽视场使得空间背景杂散光对测量精度影响增大, 锥腔热辐射增大, 测量数据精度降低。而且, 太阳扫描式测量使得仪器测量精度受轨道精度的影响更大, 辐射计中心轴与光照矢量夹角 (入射角) 难于精确测量。这些因素使得在轨定标比太阳跟踪测量复杂许多, 日地距离、冷空间背景辐射、卫星姿态变化、仪器衰减、光线入射角度

收稿日期: 2010-05-05 修订日期: 2010-08-24

基金项目: 国家自然科学基金 (61077080); 吉林省青年科研基金 (20090117) 资助项目

作者简介: 杨东军 (1979-), 男, 山东莱芜人, 在读博士, 主要从事微弱信号检测及太阳辐射计量领域的研究。

E-mail: djyang0827@163.com, Tel: (0431) 86708089

*: 通讯联系人; E-mail: fangw@cimpcn.ac.cn, Tel: (0431) 86176883

变化、温控精度、杂散光等诸多因素都会影响太阳辐照度的观测结果和精度。

本文根据该仪器一年半大量在轨太阳辐照度监测数据, 并结合地面定标实验, 考虑了日地距离、冷空间背景辐射、入射角变化对定标精度的影响, 完成了大量在轨测量数据的分析处理; 给出了相应的修正系数, 特别是入射角度修正系数的分析, 降低了由地球自转导致的入射角度偏差给测量结果带来的影响; 最后, 通过参数整定, 给出了在轨观测数据的定标方程及定标曲线。结果显示: 采用宽视场设计, 逐轨扫描太阳式测量方式在轨定标方法, 可以实现该仪器定标精度优于 5‰ 的设计要求。

2 太阳辐射监测仪定标实验及分析

太阳辐射监测仪在轨观测过程中受日地距离、卫星轨道漂移、仪器衰减、入射角偏差等多因素的影响, 观测的辐照度数据呈明显的曲线变化^[3]。为了保证仪器观测数据的科学价值, 分析出太阳辐照度变化的规律, 需要结合太阳辐射监测仪在轨扫描式测量的特点, 分析这些影响的特点, 并给出每种因素的修正系数方程和曲线, 最后得到了较为理想的定标结果。

2.1 仪器定标

由于工艺和安装偏差的存在, 太阳辐射监测仪三台绝对辐射计不能做到完全相同, 因此需要进行飞前外场定标试验。太阳辐射监测仪三台绝对辐射计放置在高精度转台上, 选择高海拔地区晴朗天气进行地面太阳跟踪测量试验, 测量结果与参加过国际比对并给出了相对于世界辐射基准

(WRR)修正系数的 SIAR-1a 和 SIAR-2c 两台绝对辐射计进行比对, 获得太阳辐射监测仪的三台绝对辐射计相对 WRR 辐射修正系数^[4,5]。

实验过程中, 太阳辐射监测仪 C01-2 观测太空背景辐射 E_{SPi} , 被定标太阳辐射监测仪 Z01-1 观测太阳辐照度 E_{Zi} , SIAR-1a 和 SIAR-2c 观测太阳辐照度分别为 E_{S1} 和 E_{S2} 。

太阳辐射监测仪的标称值 E_S :

$$E_S = (E_{S1} \times K_a + E_{S2} \times K_c) / 2 \quad (1)$$

$K_a = 1.001928$ 为 SIAR-1a 对 WRR 修正系数; $K_c = 1.000016$ 为 SIAR-2c 对 WRR 修正系数。天空背景的平均值:

$$E_{SP} = E_{SP1} + E_{SP2} + E_{SP3}, \quad (2)$$

绝对辐射计 AR_i 的比例系数:

$$R_i = (E_{zi} - E_{SPi}) / E_S \quad (i = 1, 2, 3), \quad (3)$$

经 200 次的仪器定标试验, 三台绝对辐射计的比例系数曲线如图 2 所示。分别计算三条曲线的平均值, 得到三台绝对辐射计的比例系数分别为: $R_1 = 1.0083$, $R_2 = 1.0066$, $R_3 = 1.0065$ 。

2.2 日地距离修正系数 F_{AU}

地球绕太阳运动在椭圆轨道上, 日地距离时刻改变, 导致星上所测太阳辐照度时刻变化。日地距离一般以某天日地距离 R_j 与日地平均距离 R_{AU} ($R_{AU} = 1.496 \times 10^8$ km) 的比值的平方表示该天的日地距离修正系数 F_{AU} , 可由地球绕太阳运动的椭圆方程推出:

$$\frac{1}{F_{AU}} = \left(\frac{R_{AU}}{R_j} \right)^2 = 1 + 0.0334 \times \cos(0.9856 \times j - 2.7206), \quad (4)$$

日地距离外的太阳可视为点光源, 由照度平方反比定律知, 点光源在被照表面上形成的照度与被照面到光源距离的平方成反比。而太阳常数 E 是地球和太阳平均距离上的太阳辐照度。因此, 星上所测辐照度 $E(j)$ 与日地修正系数的关系为:

$$\frac{E}{E(j)} = \left(\frac{R_i}{R_{AU}} \right)^2 = F_{AU}, \quad (5)$$

由公式 (4) 和 (5) 推出大约在 1 月 3 日 ($j = 3$) 地球离太阳最近 (近日点) 时, $E_{j=3} = 1.0334E$, 此时测量的辐照度值最大; 大约在 7 月 3 日 ($j = 184$) 地球离太阳最远 (远日点) 时, $E_{j=184} = 0.9666E$, 此时测量的辐照度值最小, 太阳辐照度在太阳常数的 $\pm 3.34\%$ 范围内随日期 (天) 变化^[6]。

日地距离对于任何时刻都是精确可知的。首

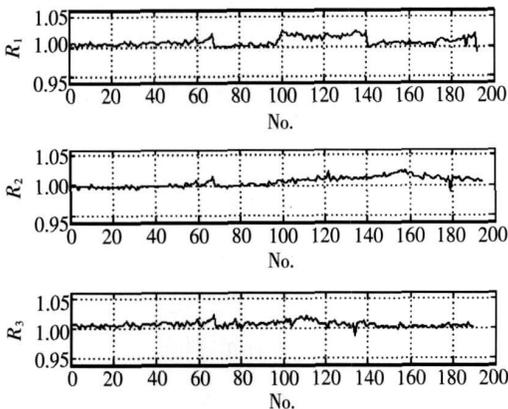


图 2 三台绝对辐射计的比例系数

Fig 2 Scale factor of the three radiometers

先利用某一时刻的准确时间求得日角值:

$$\theta = 2\pi(N - N_0) / 365.2422 \quad (6)$$

其中: N 为积日 (日期在年内的顺序号, 1月1日取 1, 12月31日取 365, 闰年取 366)。

$$F_{Au} = \sqrt{1.00423 + 0.032359 \sin\theta + 0.000086 \sin(2\theta) - 0.008349 \cos(\theta) + 0.000115 \cos(2\theta)}. \quad (8)$$

在开始采光测量前, 太阳辐射监测仪通过 1553B 总线与卫星进行通讯, 获取当前的准确地方时, 并把时间信息打入遥感源包中, 因此每个太阳辐射度测量数据包中都有测量的准确测量时间, 利用公式 (8) 可计算出日地距离修正系数, 如图 3(b) 所示。其中, 横坐标为辐照度测量数据遥感包的包序号, FY-3A 卫星每轨 101 min, 太阳辐射监测仪每轨测量一次, 最多产生 3 个数据包。每个包序号都有具体日期对应, 0-16000 包序号代表了 2008 年 5 月至 2009 年 11 月时间段。本文图中横坐标用包序号给出, 而不是用具体日期, 只是为了方便绘图。原始辐照度值曲线 (a) 中, 在 2008 年的 7 月 3 日和 2009 年的 7 月 3 日所测太阳辐射度最小, 而 2009 年 1 月 3 日所测太阳辐射度最大, 与理论计算值相同。(b) 为日地距离修正曲线, 与原始辐照度曲线趋势相反, 同样在 $\pm 3.34\%$ 范围内变化。(c) 为经日地距离修正后的辐照度曲线, 与原始辐照度曲线 (a) 相比, 波动明显减小。因此, 日地距离对测量结果的影响很大, 正确的日地距离修正是在轨定标的基础。

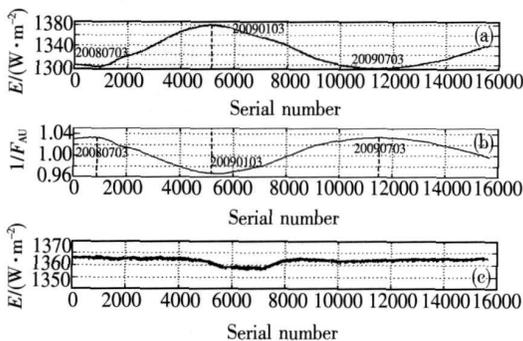


图 3 日地距离修正系数及对比

Fig 3 Distance factor and contrast between sun and earth

2.3 冷空间辐射值

太阳辐射度监测仪在轨运行时, 在测量太阳辐射度时, 4 K 温度的冷空间背景光同时进入视场, 产生背景能量 E_s , 使得测量结果偏高, 因此测量值 E 减去冷空间辐射值才能得到太阳的辐照度值 E' , 即: $E' = E - E_s$ 。

太阳辐射监测仪的工作原理是以入射光和电

$$N_0 = 79\,6764 + 0.2422 \times$$

$$(\text{年} - 1985) - NT / [(\text{年} - 1985) / 4], \quad (7)$$

根据日角值, 利用天文公式计算日地距离修正系数:

功率加热交替定标的方式来测量光辐照度的绝对量值。探测器的接收腔上埋藏电加热丝, 快门开时, 接收腔接收入射的光辐射 P_0 (观测阶段), 经一段时间接收腔升温到最大值, 接收腔与热沉达到热平衡, 记录温度传感器 (热电偶) 输出数值。然后关闭快门 (电定标阶段), 调整在接收腔的电加热丝上所加电功率, 再经与观测阶段相同的时间, 使接收腔与热沉达到热平衡, 接收腔的温度平衡在同观测阶段的温度最高值相同的温度, 则 (电定标阶段) 电加热丝上所加电功率 P_e 就等于 (观测阶段) 入射的光辐射功率 P_0 [7, 8]。可推得冷空间辐射计算公式:

$$E_s = \frac{P_e - P_k - (T_e[t_m] - T_{RBD})S}{A}, \quad (9)$$

其中: $P_e = V_e^2/R$ 为加热丝高压加热时的功率; $P_k = V_k^2/R$ 为加热丝低压加热的功率; $T_e(t_m)$ 为电定标阶段热电偶输出稳定值; T_{RBD} 为冷空间时电信号采样读数; R 为锥腔内加热丝电阻; S 为自测试灵敏度; A 为主光阑面积; V_e 和 V_k 为热电偶输出电压。 R 和 A 在卫星发射前已精密测得, 遥感数据源包中包含了 $T_e(t_m)$ 、 V_e 、 V_k 、 T_{RBD} 、 S 等信息, 通过包内数据的提取分解, 由公式 (9) 即可求出冷空间辐射值 E_s 。

2.4 入射角修正系数

太阳辐射计的三台绝对辐射计 AR_i ($i = 1 \sim 3$) 同卫星 X 轴分别成 22° 、 27° 和 32° 。在图 1 中给出, 三台绝对辐射计的无遮拦视场为 $\pm 9.2^\circ$ (太阳光斑全部进入辐射计), 辐射计的全视场为 $\pm 17^\circ$ (太阳光刚刚入射时所对应的视场)。太阳辐射计在轨测量采用扫描的方式, 当太阳光矢量同卫星轨道面成 α 角进入辐射计的视场时, 辐射计捕获太阳并开始长达 6 min 的采光, 利用最后稳定的采样值计算辐照度值。绝对辐射计是在全视场 ($\pm 17^\circ$) 上捕获太阳光, 随后打开快门开始测量, 再进行 6 min 的数据采样, 因此, 太阳光矢量同辐射计光轴的夹角 (即入射角) 在采样结束时刻和刚捕获太阳光时刻存在偏移角, 不能以刚捕获太阳光时候的全视场 ($\pm 17^\circ$) 代替采样结束时

刻的夹角。因此需要通过捕获太阳时的入射角 α 推导出偏移角, 对辐照度测量结果进行修正, 给出入射角修正系数^[9-10]。

图 4 给出了辐射计 AR₁ 和 AR₃ 的视场、太阳光入射角度 α 以及偏移角的矢量图。偏移角可以通过下面的方法推导。

卫星的运行周期为 101.6 min, 卫星角速度为 $w = 360^\circ / 101.6 \text{ min} = 3.543^\circ / \text{min}$ 。根据卫星的角速度可求出辐射计观测太阳的 6 min 内, 太阳光扫过辐射计视场角度(图 4 中 AB):

$$AB = 3.543^\circ / \text{min} \times 6 \text{ min} = 21.258^\circ, \quad (10)$$

地球一天自转 360°, 地球自转角速度为 $w' = 360^\circ / 24 \text{ h} = 0.25^\circ / \text{min}$ 。根据地球自转的角速度可以求出辐射计观测太阳的 6 min 内, 地球相对太阳旋转的角度(图 4 中 BC):

$$BC = 15^\circ / 60 \text{ min} \times 6 \text{ min} = 1.5^\circ, \quad (11)$$

太阳光在辐射计上扫过的轨迹 AC 为 AB 与 BC 的矢量和, 即:

$$\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC} = \sqrt{21.258^2 + 1.5^2} = 21.30^\circ, \quad (12)$$

太阳光矢量同辐射计 AR₁ 光轴的偏角为 O₁C, 太阳光矢量同辐射计 AR₃ 光轴的偏角为 O₃C。AR₁ 的指向角为 A₁ = 22°; AR₂ 的指向角为 A₂ = 27°; AR₃ 的指向角为 A₃ = 32°。

由图 4 中 O₁ 圆上存在几何关系: A'B' = AB = 21.258°, A'D₁ = AD₃ = | $\alpha - A_3$ |, D₁E₁ = AB, E₁C = A₁ - ($\alpha - 1.5$), 由此可以推得:

$$D_1O_1 = \sqrt{A'O_1^2 - A'D_1^2} = \sqrt{17^2 - (\alpha - A_3)^2}, \quad (13)$$

$$O_1E_1 = D_1E_1 - D_1O_1 = AB - D_1O_1 = 21.258^\circ - \sqrt{17^2 - (\alpha - A_3)^2}, \quad (14)$$

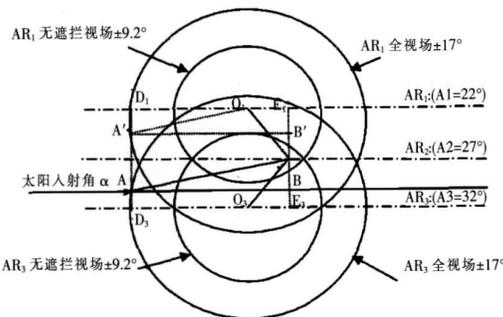


图 4 辐射计视场与太阳光矢量

Fig 4 Viewing field of the radiometer and vector of solar radiation

$$O_1C = \sqrt{O_1E_1^2 + E_1C^2} = \sqrt{\{ [21.258^\circ - \sqrt{17^2 - (\alpha - A_3)^2}]^2 + [A_1 - (\alpha - 1.5)]^2 \}^{\frac{1}{2}}}, \quad (15)$$

同理可以推得:

$$O_3C = \sqrt{O_3E_3^2 + E_3C^2} = \sqrt{\{ [21.258^\circ - \sqrt{17^2 - (\alpha - A_3)^2}]^2 + [A_3 - (\alpha - 1.5)]^2 \}^{\frac{1}{2}}}, \quad (16)$$

通过上述推导, 得到三个绝对辐射计 AR_i (i = 1 ~ 3) 偏角的一般公式为:

$$\gamma_i = \sqrt{\{ [21.258^\circ - \sqrt{17^2 - (\alpha - A_j)^2}]^2 + [A_i - (\alpha - 1.5)]^2 \}^{\frac{1}{2}}}, \quad (17)$$

其中: i 为 1, 2, 3 辐射计, j 为 $\alpha - A_j$ 最小的辐射计。

测量中捕获太阳光打开快门测量开始的时刻, 是由这三个绝对辐射计中哪一个先接收到了太阳光, 即太阳光入射角 α 最接近于哪一个辐射计角的时刻开始的。当图 4 中只有 AR₁ 和 AR₃, 假设太阳入射角 $\alpha = 30^\circ$, 则 $\alpha - A_1 = 30^\circ - 22^\circ = 8^\circ$, $\alpha - A_2 = 30^\circ - 27^\circ = 3^\circ$, $\alpha - A_3 = 30^\circ - 32^\circ = -2^\circ$, 因此 $\alpha - A_3$ 最小, j = 3 即 AR₃ 先捕获了太阳辐射(在 A 点)。此时偏角为 $\gamma_1 = \sqrt{\{ [21.258^\circ - \sqrt{17^2 - (30^\circ - A_3)^2}]^2 + [A_1 - (30^\circ - 1.5)]^2 \}^{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\{ [21.258^\circ - \sqrt{17^2 - (30^\circ - 32^\circ)^2}]^2 + [22^\circ - (30^\circ - 1.5)]^2 \}^{\frac{1}{2}}} = 7.836^\circ$ 。

太阳辐照度 E 是大气顶端的辐射通量密度, 即 $E = d\phi/dA$, 辐照度与照射面积有关。在入射角出现偏差的情况下, 有效面积 A 和实际面积 B 的关系为: $B = A / \cos\gamma$ 因此以 $1/\cos\gamma$ 作为入射角度修正系

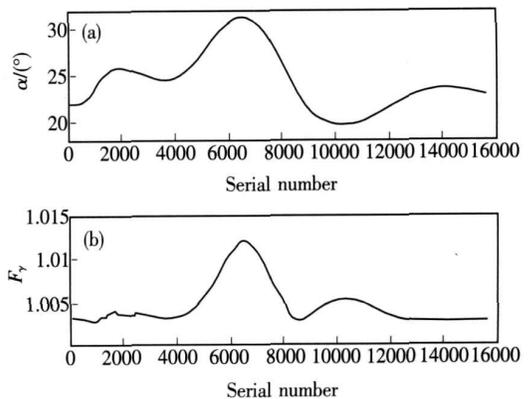


图 5 (a)入射角度; (b)角度修正系数。

Fig 5 (a) Angle of incidence (b) Correction factor of angle

数 F_{ν} 。

太阳光入射角 α 由国家卫星气象中心结合轨道姿态参数给出, 曲线如图 5(a)。入射角度曲线表示测量太阳辐照度时, 辐射计中心轴与太阳光的夹角。太阳同步轨道卫星的特点决定了每轨辐照度测量时入射角均不同。通过分析每次测量时 $\alpha - A_j$ 大小, 判断最先捕获太阳的通道, 利用公式 (17) 计算每次测量的入射角度修正系数, 曲线如图 5(b)。

3 结果与讨论

综合分析仪器定标、冷空间背景辐射、日地距离修正和角度修正对所测太阳辐照度的影响, 给出仪器在轨定标公式:

$$E'_1 = (E_1 - E_{s1}) \times E_{AU_1} \times R_1 \times F_{Y_p} \quad (18)$$

太阳辐照度连续测量的原始数据, 如图 6(a), 利用公式 (18) 定标后的曲线如图 6(b) 所示。定标后辐照度平均值 $E_{mean} = 1\,366\,130\text{ W/m}^2$, 最

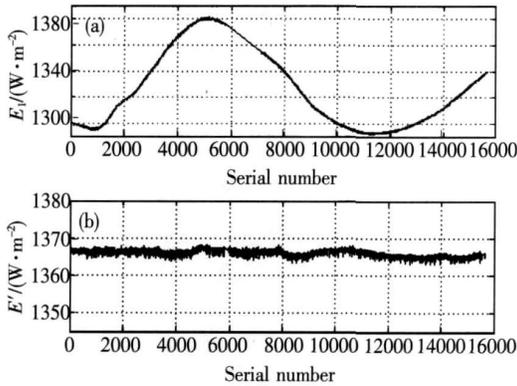


图 6 (a) 原始辐照度值; (b) 预处理结果。

Fig 6 (a) Initial solar irradiance (b) Result of pre-processing

大值 $E_{max} = 1\,367\,811\text{ W/m}^2$, 最小值 $E_{min} = 1\,364\,042\text{ W/m}^2$, 计算最大偏差 $\sigma = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{mean}} = \frac{1\,367\,811 - 1\,364\,042}{1\,366\,130} \times 1000 = 2.759\%$, 因此太

阳辐射监测仪的定标最大偏差为 2.759%, 满足了仪器定标精度优于 5% 的设计要求, 初步满足太阳辐照度空间监测的要求, 并可为地面辐照度应用提供可靠的数据参考。

4 结 论

在轨定标是太阳辐射监测仪入轨后的首要工作, 有效的定标方法才能使在轨观测数据具有价值。正确的定标方法依赖于外场定标实验和各种在轨影响因素的分析及修正, 以及修正算法的实现。国际上 PMO₆、TM 等诸多高精空间太阳辐照度观测仪器的常年观测, 太阳辐照度每 11 年一个周期变化^[11], 每个周期的波动很小。在初步分析冷空间背景辐射、日地距离和入射角度偏差的影响及修正的情况下, 通过大量数据的统计、分析, 给出了定标方程, 使卫星太阳辐射监测仪定标精度达到了 5% 以内, 基本满足任务要求。

本文处理的是一年半内的辐照度数据, 时间短, 期间辐照度的变化非常小, 因此本文理想的定标结果应近似为直线。但由于包括仪器锥腔长期受太阳辐射引起的辐射计衰减、空间环境杂散光、仪器热电偶灵敏度降低和温控波动大等不确定因素的存在, 影响了定标精度的进一步提高, 这也是后续研究工作的重点。

参 考 文 献:

- [1] Wang R Q, W S R, Li F T, et al. Data process and validation for FY-3A solar backscatter ultraviolet spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2010, **18** (5): 1086-1089 (in Chinese).
- [2] Wang Y P, Fang W, Yu B X. Stray light characteristics of WFOV absolute radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2008, **16** (3): 433-437 (in Chinese).
- [3] Crommelynck D A, Dewitte S. Metrology of total solar irradiance monitoring [J]. *Adv Space Res*, 1999, **24** (2): 195-204.
- [4] Yang D J, Fang W, Wang Y P. The data processing platform of the solar irradiance calibration based on the MATLAB GUI [J]. *Computer Measurement & Control* (计算机测量与控制), 2009, **17** (7): 1426-1428 (in Chinese).
- [5] Mai Z Q, Li F Y, Ren J W, et al. The long term working stability of space borne calibration LED light source [J]. *Chin J. Luminescence* (发光学报), 2007, **28** (5): 748-753 (in Chinese).
- [6] Wang W, Fang W, Yu B X. Research on calibrated factors of SFM on FY-3 satellite [J]. *J. Changchun University of Science and Technology* (长春理工大学学报), 2003, **26** (3): 82-91 (in Chinese).

- [7] Yu B X, Fang W. Solar radiation measurement on ShenZhou-3 spacecraft [J]. *Chinese Journal of Space Science* (空间科学学报), 2004, **24**(2): 119-123 (in Chinese).
- [8] Wang R, Song K F. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2009, **17**(3): 469-474 (in Chinese).
- [9] Yu B X, Fang W, Wang Y P. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2004, **12**(4): 353-358 (in Chinese).
- [10] Wan Z H, Ren J W, Li X S H, *et al*. The development of a kind of apparatus for measuring infrared spectral emissivity [J]. *Chin. J. Luminescence* (发光学报), 2008, **29**(1): 200-203 (in Chinese).
- [11] Kopp G, Heuement K, Lawrence G. The total irradiance monitor (TM): Instrument calibration [J]. *Solar Physics* 2005, **230**(1-2): 91-109.

On-orbit Data Calibration of FY-3A Solar Irradiance Monitor

YANG Dong-jun^{1, 2}, FANG Wei¹, QIU Hong³, QI Jin³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract The solar irradiance monitor (SM), a payload on the FY-3A satellite, is mainly used to monitor the change of solar irradiance. The SM with wide angle of viewing field scans the sun every orbit. This kind design simplifies the system structure, but makes the on-orbit calibration more difficult. Based on the data obtained by SM in more than one year, we study the factors that affect the calibration precision experimentally and theoretically, giving the equation and curve. First, by the ground-calibration experiment comparing with the World Radiometric Reference (WRR), we get the scale factors of the three radiometers, $R_1 = 1.0083$, $R_2 = 1.0066$ and $R_3 = 1.0065$. Then, by the theoretical analysis of distance between sun and earth and the data curve of the solar irradiance measured, it is proved that the max solar irradiance is at perihelion (3 January) and the min solar irradiance is at aphelion (3 July), and the solar irradiance changes at the range of $\pm 3.34\%$ with the time variant. Using the astronomical formula and based on the correct time in the remote packages, gets the distance correction factor between sun and earth. It is obvious that the distance between sun and earth affects the calibration precision. In addition, analyzing the affection of the space background on the calibration precision and gets the calibration formula of the space irradiance. Furthermore, combining the characteristics of the wide field of view and the measurement method of step-scanning sun, the effects of the difference from incidence angle between just and over capturing sunlight on the solar irradiance measurement are mainly analysed, getting the formula of the correction factor and curve with analysing the geometric parameters. Finally analyzing all of correction factors, the on-orbit calibration formula and curve are given.

Key words solar irradiance monitor; incidence angle; on-orbit calibration

CLC number P182.2

PACS 96.60.Ub

PACC 9660T

Document code A