

文章编号: 0253-2239(2005)08-1048-5

# 卫星上绝对辐射计观测太阳时与太空的辐射交换

禹秉熙 方伟 王玉鹏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130031)

**摘要:** 分析了卫星上用宽视场绝对辐射计(常温 300 K)观测太阳时与其视场内太空冷背景(4 K)的辐射交换,它实际上是辐射计的接收腔向太空发射辐射,相当于辐射计接收了“负辐射”。视场宽时太空背景的这一“负辐射”量是不能忽略的,由于观测太阳(其视角很小为  $32'$ )的同时接收了充满其视场的太空“负辐射”,因此直接测得的数据比实际太阳辐射量值要小,需要加上这一“负辐射”量才能得到真正太阳辐射量值。研究出了用电功率补偿三步测量工作流程同时测量这一“负辐射”量和太阳辐照度的方法。在神州三号飞船轨道舱太阳常数监测器上的宽视场绝对辐射计采用这种工作流程测量了太阳辐照度,测得太空背景的“负辐射”值同计算值相同。

**关键词:** 空间光学; 测量与计量; 太阳辐照度; 辐射交换; 太空; 绝对辐射计

中图分类号: O432 文献标识码: A

## The Radiation Exchange between the Space and the Absolute Radiometer Along with the Solar Observation on Spacecraft

Yu Bingxi Fang Wei Wang Yupeng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031)

**Abstract:** The radiation exchange between the cold space (4 K) and the absolute radiometer (300 K) with wide field of view mounted on satellite is analysed when the sun is observed. That is the radiometer export radiation to space. It is equal to “minus radiation” received the by radiometer. When the field of view is wide, the “minus radiation” of absolute radiometer could not be ignored. The “minus radiation” which is full of its field of view is received, so the data measured are less than the pure solar irradiance, and the solar irradiance is the value that the “minus radiation” adding the original data. The three-step work flow chart of absolute radiometer that can measure the “minus radiation”, solar irradiance and electric compensation has been investigated. The absolute radiometer of solar constant monitor with wide field of veiw mounted on Shenzhou-3 spaceship measured solar constant in this work flow chart. The measured “minus radiation” value is equal to calculated value.

**Key words:** space optics; measurement and metrology; solar irradiance; radiation exchange; space; absolute radiometer

### 1 引言

绝对辐射计是黑体腔型热电探测器,探测辐射遵守热辐射物体的辐射交换原则。绝对辐射计直接探测出的是其视场内目标、其他物体和背景的所有辐射量之和与辐射计腔(温度)的热辐射之差值。只有辐射计的温度在 0 K 时才能直接测得目标的辐射功率。绝对辐射计在常温(300 K 左右)工作时,要在直接测得的辐射值上加辐射计在其视场上输出的热辐射功率才能获得目标的真正辐射量值。若用常

温辐射计探测低于其温度的目标辐射,直接测得的是“负辐射”,再加上辐射计视场上输出热辐射量才是目标的真正辐射量,目标辐射不可能是负值。用宽视场绝对辐射计观测太阳光(视角  $32'$ )时,辐射计接收太阳辐射的同时,同充满其视场的太空冷背景之间进行辐射交换,也就是从辐射计(300 K)向太空冷背景(4 K)输出辐射,相当于辐射计从太空背景接收了“负辐射”。所以在辐射计视场中的背景,目标或其他物体,无论其温度高低都对辐射计的

作者简介: 禹秉熙(1938~),男,辽宁新宾县人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感仪器研制工作。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2004-07-21; 收到修改稿日期: 2004-11-25

响应做贡献。视场宽时,在观测太阳光时这一“负辐射”是不能忽略的。测得的太阳辐射数据中含有这一“负辐射”,因此直接测得的太阳辐照度值要比真正的太阳辐照度小一些,在原数据上把这一“负辐射”量加上才能获得太阳辐照度值。绝对辐射计测量工作程序中要有能够测得这一“负辐射”量的方法。用跟踪太阳的方法使太阳光沿辐射计光轴入射的情况下,可以用窄视场限制背景的方法使其对太阳辐射测量的影响小到能够忽略的程度。

根据热辐射物体的辐射交换原理,分析了绝对辐射计同太阳辐射、太空冷背景辐射之间的辐射交换,研究了它同视场的关系和辐射计温度抖动变化对太阳辐照度测量精度的影响。提出了用电功率补偿三步测量工作流程同时测量这一“负辐射”量和太阳辐照度的方法。

在神舟三号飞船轨道舱上用三台宽视场太阳辐射照绝对辐射计(SIARs)<sup>[1~4]</sup>组装的太阳常数监测器<sup>[5~7]</sup>指向太阳安装、在飞行中太阳越过辐射计视场期间测量了太阳辐照度。测量太阳辐照度时,采用了电功率补偿三步测量工作流程。测得的太空背景“负辐射”值同计算值基本相同,在考虑了这一“负辐射”量后获得的太阳辐照度值在国际上公认的量值误差范围之内,也与同期国外卫星获得的数据一致<sup>[6]</sup>,验证了本文的分析。因此,风云三号气象卫星太阳辐照度监测仪也采用了这种测量方法<sup>[8~10]</sup>。

## 2 绝对辐射计与其视场内物体的辐射交换

### 2.1 两个热辐射物体的辐射交换

绝对辐射计是黑体腔型热探测器,它在光辐射的几乎全光谱范围(0.2~50 μm 或更宽)都能响应,因此对具有任何温度的物体的辐射都能测量。探测辐射遵守热辐射物体的辐射交换原则。

考虑温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$ , 表面为  $S_1$ 、 $S_2$ , 辐射率为  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ , 相距  $r$  的两个物体的热辐射交换情况如图 1 所示。那么  $S_1$  接收  $S_2$  的辐射的同时  $S_1$  也向  $S_2$  输出辐射,因此  $S_1$  接收的净辐射应该是它们之间的差值。

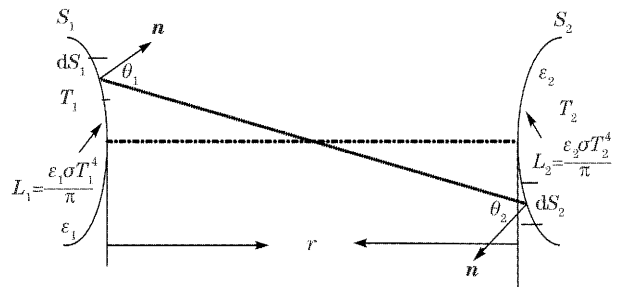


图 1 两个物体的热辐射交换示意图

Fig. 1 The sketch map of radiation exchange between two objects

根据热辐射物体之间辐射交换原理, $S_1$  面上接收来自  $S_2$  的净辐射功率可表示为

$$\begin{cases} \phi_{S_{1,2}} = \phi_{S_2 \rightarrow S_1} - \phi_{S_1 \rightarrow S_2} = \iint_{S_1 S_2} \frac{(L_2 - L_1) \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dS_2 dS_1, \\ \phi_{S_{1,2}} = \iint \frac{\sigma(\epsilon_2 T_2^4 - \epsilon_1 T_1^4)}{\pi} \cdot \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dS_2 dS_1 = \phi_{S_2} - \phi_{S_1}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L_1$  为  $S_1$  表面的辐亮度; $L_2$  为  $S_2$  表面的辐亮度; $\sigma$  为斯蒂芬-玻兹曼常量 $[5.67 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)]$ ;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为面元  $dS_1$ 、 $dS_2$  的法线与传输的夹角。

$$\begin{cases} \phi_{S_1} = \iint \frac{\epsilon_1 \sigma T_1^4}{\pi} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dS_2 dS_1, \\ \phi_{S_2} = \iint \frac{\epsilon_2 \sigma T_2^4}{\pi} \frac{\cos \theta_2 \cos \theta_1}{r^2} dS_1 dS_2, \end{cases} \quad (2)$$

把  $S_1$  当成绝对辐射计的接收面(主光栏内的腔), $S_2$  为被辐射计视场所看到的目标,就可以看出,绝对辐射计探测出的是其视场内(待测目标、其他物体和背景)所有辐射量之和与辐射计腔(温度)的热辐射交换之差值。只有当绝对辐射计是在温度  $T_1 = 0 \text{ K}$  下工作时,才能用绝对辐射计直接测得被测目标的

辐射量(功率):

$$\phi_{S_2} = \iint \frac{\epsilon_2 \sigma T_2^4}{\pi} \frac{\cos \theta_2 \cos \theta_1}{r^2} dS_1 dS_2,$$

如果绝对辐射计是在常温( $T_1 = 300 \text{ K}$  左右)下工作,那么直接测得的是如公式(1)所示目标辐射与辐射计腔体辐射交换之差值  $\phi_{S_{1,2}}$ , 要获得待测目标的真正辐射量  $\phi_{S_2}$ , 则必须在直接(相对于辐射计温度)测得的辐射量  $\phi_{S_{1,2}}$  上加辐射计在其视场发出的腔体的(温度)热辐射量

$$\phi_{S_1} = \iint \frac{\epsilon_1 \sigma T_1^4}{\pi} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dS_1 dS_2,$$

才能获得待测目标的真正辐射量  $\phi_{S_2}$  :



最终要获得太阳辐照度,在用电定标的功率  $E_0 = P_e/A$  以外还得加  $E_1 = \sigma(T_1^4 - T_s^4) \sin^2 \omega$ , 也就是辐射计快门  $T_1 = 300$  K 和冷空间  $T_s = 4$  K 之间的辐射交换。这是绝对辐射计视场内除了  $32'$  的太阳光斑以外  $4$  K 冷空间辐射被辐射计接收的“负辐射”,即腔向冷空间的辐射。

冷空间的辐射亮度相对常温  $300$  K 来说,  $L_s = \sigma T_s^4 / \pi = \sigma \cdot 4^4 / \pi = 0$ , 几乎可以忽略。

神舟三号飞船太阳常数监测器的视场为  $\omega = 7.5^\circ$ ,  $T_1 = 300$  K。

$$E_1 = \sigma(T_1^4 - T_s^4) \sin^2 \omega = \sigma T_1^4 \sin^2 \omega = 5.67 \times 10^{-8} \times 81 \times 10^8 \times 0.017 = 7.8 \text{ W/m}^2,$$

神舟三号飞船上实际测得的值为  $9.0 \text{ W/m}^2$ , 同计算值  $7.8 \text{ W/m}^2$  的差别可能是视场光栏不准引起的。

风云三号太阳辐照度监测仪(SIM)视场角  $\omega = 13.3^\circ$ ,  $T_1 = 300$  K 时

$$E_1 = \sigma(T_1^4 - T_s^4) \sin^2 \omega = \sigma T_1^4 \sin^2 \omega = 5.67 \times 10^{-8} \times 81 \times 10^8 \times 0.52 = 24.3 \text{ W/m}^2,$$

而当  $\omega = 3^\circ$  时为  $1.3 \text{ W/m}^2$ , 同  $E_s = 1367 \text{ W/m}^2$  相比, 其影响不及  $0.1\%$ 。

可以看出视场很窄时冷空间和辐射计之间的辐射交换可以忽略。但是, 视场宽的时候它是不能忽略的, 必须按(9)式加在观测数据中才能获得太阳辐照度值。

### 3 辐射计的温度变化对太阳辐照度测量精度的影响

根据误差公式, 对(9)式微分, 有

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s}{\partial T_1} = \frac{\partial E_0}{\partial T_1} + \frac{\partial E_1}{\partial T_1}, & (10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s}{\partial T_1} = 4\sigma T_1^3 \sin^2 \omega = (\sigma T_1^4 \sin^2 \omega) \frac{4}{T_1} = \frac{4E_1}{T_1}, & (11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta E_s}{E_s} = \frac{1}{E_s} \frac{4\Delta T_1}{T_1} \cdot E_1. & (12) \end{cases}$$

假设绝对辐射计在打开快门观测太阳和关闭快门电校准的一个测量周期(约  $3 \text{ min}$ ), 快门的温度改变了  $\Delta T_1 = 1$  K,  $T_1 = 300$  K,  $\omega = 13.3^\circ$ , 对太阳常数  $E_s = 1367 \text{ W/m}^2$ , 则有

$$\frac{\Delta E_s}{E_s} = \frac{1}{1367} \cdot \frac{4 \times 1}{300} \cdot 24.3 = 0.024\%,$$

$\Delta T_1 = 3$  K 时, 也只有  $0.073\%$ 。

对太阳辐照度量级来说, 即使快门的温度在测

量中变化  $\Delta T_1 = 3$  K, 对太阳辐照度测量的影响只有  $0.07\%$ 。

也就是辐射计的温度抖动变化对测量太阳辐照度  $E_s$  的(9)式中  $P_e/A$  项不产生影响, 这是因为太阳辐射温度相当于  $5900$  K, 而辐射计温度  $T_1 = 300$  K 辐射计热辐射可忽略。只对  $\sigma(T_1^4 - T_s^4) \sin^2 \omega$  项产生影响。由于绝对辐射计的视场比太阳的视角大得多, 所以  $T_1 = 300$  K 的辐射仍然对其测量值有一定的贡献( $2\%$ ), 每次测量中如果能实际测得  $E_1$ , 那么辐射计温度抖动变化对太阳辐照度测量的误差就消除了。

### 4 电功率补偿三步工作流程

用宽视场绝对辐射计观测太阳时, 为了获得太阳辐照度值, 就必须确定辐射计接收冷空间的“负辐射”量, 绝对辐射计的一般测量方法对“负辐射”虽然可以显示腔温响应的负信号, 但是无法给出电定标的负功率, 因此不能确定其量值。为此, 绝对辐射计采用了电功率补偿, 分观测冷空间(待测状态)、太阳光入射(观测状态)和电功率定标(电定标阶段)三步进行测量的工作流程。这一测量流程能够测定出冷空间的“负辐射”量和太阳辐照度。

绝对辐射计在空间测量太阳辐照度的工作流程如图 3 所示。主要包括:

1) 辐射计开快门对冷空间(待测状态)时, 腔上加高功率  $P_H$  ( $P_H$  要大于太阳入射辐射功率  $P_0$ ), 温度传感器监测的主腔温度响应(热平衡时)为  $T_H$ , 那么这时腔上的总功率为

$$P_H + \sigma(T_s^4 - T_0^4) \sin^2 \omega \cdot A. \quad (13)$$

2) 当太阳光辐射进入辐射计进行测量(观测阶段)时, 把电加热功率从  $P_H$  降到  $P_L$ , 也就是说太阳光  $P_0$  入射时加一个补偿电功率  $P_L$ , 使  $P_0 + P_L = P_H$  监测的腔的温度响应仍然为  $T_H$ , 那么腔上的总功率为

$$P_L + \sigma(T_s^4 - T_0^4) \sin^2 \omega \cdot A + E_s \cdot A, \quad (14)$$

3) 关闭快门电加热功率为  $P_e$  (电定标阶段)

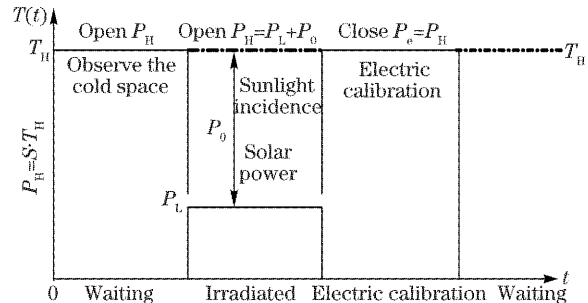


图 3 辐射计测量流程

Fig. 3 Radiometer measurement flow chart

时,使监测的腔温响应也仍然为  $T_H$ ,则腔接收的总功率为

$$P_e + \sigma(T_1^4 - T_0^4)\sin^2\omega \cdot A, \quad (15)$$

那么在(13)式~(15)式三个阶段接收腔上的总功率是相同的,即

$$P_e + \sigma(T_1^4 - T_0^4)\sin^2\omega \cdot A = P_L + \sigma(T_S^4 - T_0^4)\sin^2\omega \cdot A + E_S \cdot A, \quad (16)$$

从(16)式可得

$$E_S = \frac{P_e - P_L}{A} + \sigma(T_1^4 - T_S^4)\sin^2\omega, \quad (17)$$

又由于

$$P_H + \sigma(T_S^4 - T_0^4)\sin^2\omega \cdot A = P_e + \sigma(T_1^4 - T_0^4)\sin^2\omega \cdot A, \quad (18)$$

因此

$$\begin{cases} A \cdot \sigma(T_1^4 - T_S^4)\sin^2\omega = P_H - P_e, \\ \sigma(T_1^4 - T_S^4)\sin^2\omega = (P_H - P_e)/A. \end{cases} \quad (19)$$

最后,可得到太阳辐照度值:

$$E_S = \frac{P_e - P_L}{A} + \frac{P_H - P_e}{A}, \quad (20)$$

$P_e, P_L, P_H$  是测量中数据采集得到的,  $A$  为辐射计主光栏的面积,其值是已知的。(20)式中第一项  $(P_e - P_L)/A$  是对入射太阳光的电定标值,由于这时观测太阳的同时接收了冷空间的“负辐射”,所以这个量值比净太阳辐射量少这一“负辐射”。 $(P_H - P_e)/A$  就是在辐射计视场内 4 K 冷空间对辐射计的这一“负辐射”量,即辐射计向冷空间的辐射。它是通过辐射计打开快门对冷空间(太阳尚未入射时)加的高功率  $P_H$  (这时腔温响应为  $T_H$ ) 和电定标功率  $P_e$  (这时腔温响应仍然为  $T_H$ ) 求出的。由于  $P_H$  是辐射计接收腔对冷空间时为使腔温响应为  $T_H$  的电功率,而  $P_e$  是接收腔对快门( $T_1 = 300$  K) 时使腔温响应同样为  $T_H$  的功率,因此,  $P_H > P_e$ 。 $(P_H - P_e)/A$  是在每次测量太阳辐射的同时测得的。

## 5 结 论

绝对辐射计的测量工作流程分为打开快门观测太空、测量太阳和关闭快门电定标三步,并且电功率加热补偿,使黑体腔始终在高功率状态下工作的方法,测得辐射计接收的“负辐射”功率。在神州三号

飞船轨道舱上用三台宽视场太阳辐照绝对辐射计(SIARs)组装的太阳常数监测器上用这种测量程序测得的太空背景“负辐射”量值(照度)同计算结果基本相同,验证了本文分析的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 Fang Wei, Jin Xifeng. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1992, **13**(3): 406~411 (in Chinese)  
方 伟,金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. 太阳能学报, 1992, **13**(3): 406~411
- 2 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun *et al.*. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 112~116 (in Chinese)  
方 伟,禹秉熙,姚海顺等. 太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1)与国际比对[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 112~116
- 3 Yu Bingxi, Fang Wei, Wang Yupeng. The radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2004, **12**(4): 353~358 (in Chinese)  
禹秉熙,方 伟,王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳越过视场时入射光变化与腔温响应函数[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(4): 353~358
- 4 Yu Bingxi, Yao Haishun, Fang Wei. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electric substitution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 786~790 (in Chinese)  
禹秉熙,姚海顺,方 伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 786~790
- 5 Fang Wei, Yu Bingxi. A new method of measuring solar constant on polar-orbit satellite [J]. *J. Remote Sensing*, 1997, **1**(4): 241~245 (in Chinese)  
方 伟,禹秉熙. 极轨道卫星上测量太阳常数的新方法[J]. 遥感学报, 1997, **1**(4): 241~245
- 6 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun. Solar irradiance measurement on Shenzhou-3 spacecraft [J]. *Chin. J. Space Science*, 2004, **24**(2): 119~123 (in Chinese)  
禹秉熙,方 伟,姚海顺. 神舟3号飞船上太阳辐射测量[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(2): 119~123
- 7 Fang Wei, Yu Bingxi. Absolute radiation measurement technology on space [C]. *Symposium of the Theses and the Theses Abstracts for Fifty Anniversary of the Institute (1952~2002) (one)*, 2002: 129~147 (in Chinese)  
方 伟,禹秉熙. 空间绝对辐射测量技术[C]. 纪念建所五十年(1952~2002)论文及论文摘要汇编(一), 2002: 129~147
- 8 Fang Wei, Yu Bingxi. Easily performed method of solar total irradiance measurement in space [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3501**: 469~474
- 9 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun *et al.*. STIM on satellite [C]. *The Eleventh National Symposium on Remote Sensing Technology*, 1999. 65~66 (in Chinese)  
方 伟,禹秉熙,姚海顺等. 星载太阳辐照度监测仪(STIM) [C]. 第十一届全国遥感技术学术交流会论文集, 1999. 65~66
- 10 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun *et al.*. Development of STIM [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4895**: 218~224