

文章编号 1004-924X(2004)04-0353-06

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

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, 吉林 长春 130033)

摘要:研究了卫星上指向太阳安装的宽视场绝对辐射计在轨飞行中,太阳越顶扫过其视场期间接收的辐射功率随时间的变化,给出了绝对辐射计接收这种时变辐射功率的情况下腔温响应函数。只要绝对辐射计的视场宽到一定程度($\geq 10^\circ$),太阳越过视场的这段时间太阳辐照基本上是恒定的,辐射计的腔温响应也能达到平衡,根据这一腔温响应的平衡点关闭快门进行电功率定标就能获得太阳辐照度值。并将这种测量方法用于神舟3号飞船上用3台 15° 视场太阳辐照绝对辐射计(SIARs),测量了太阳辐照度。实验结果表明:所测数据与同期卫星上获得的数据基本一致,这也表明了本方法的可行性。

关键词:绝对辐射计;太阳辐照度;腔温响应;神舟3号飞船

中图分类号:O157.1 **文献标识码:**A

Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite

YU Bing-xi, FANG Wei, WANG Yu-peng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The change of the sun incidence power with time during the sun flies over the view field of the absolute radiometer mounted on spacecraft, and the temperature response function under the change were given. While the view field is 10° , the solar irradiance is invariable, and the temperature response of the cavity of absolute radiometer reaches balance. And the solar irradiance value can be observed by closing the shutter at the balance point and electric calibrating. The solar irradiance was measured in this way by the solar constant monitor mounted on Shenzhou-3 spacecraft, which is consisted of three Solar Irradiance Absolute Radiometers (SIARs) with 15° view field. The result is: the data correspond well with that measured on other satellite in the same term. And the result also indicates that the method is feasible.

Key words: absolute radiometer; solar irradiance; temperature response of cavity; Shenzhou-3 spacecraft

收稿日期:2004-04-06;修订日期:2004-06-14.

基金项目:应用光学国家重点实验室资助项目

1 引言

一般用绝对辐射计测量太阳辐照度,在观测太阳期间必须使太阳光线始终沿辐射计的光轴(即垂直于绝对辐射计接收腔前的主光栏)入射。在轨道上飞行的卫星上要使太阳光线始终保持沿辐射计光轴入射,就需要太阳跟踪装置。在神舟 3 号飞船太阳常数监测器^[1]上采用指向太阳安装的宽视场绝对辐射计,不跟踪太阳,在飞行中太阳越过辐射计视场期间测量太阳辐照度的方法^[2],测得的结果与国外同期卫星上测得数据一致^[3],达到国际同类仪器测量的精度。在风云 3 号气象卫星太阳辐照度监测仪^[4-6]的方案也采用了这种测量方法。

本文研究了在辐射计视场中太阳扫过的时候在腔上接收的辐射功率的随时间变化及其作用下腔温响应函数。腔接收功率的时间变化近似的为梯形函数,有一段保持恒定,根据这一辐射变化求解的腔温响应函数表明:腔温响应能够达到平衡,根据这一腔温响应平衡点,关闭快门进行电功率定标就能够获得太阳辐照度值。

2 绝对辐射计视场与辐射功率变化函数

太阳在绝对辐射计视场上越顶扫描过程中接收的辐射功率是变化的,现在分析一下其变化函数。绝对辐射计的视场与太阳光辐射越顶扫过的示意图,如图 1 所示。

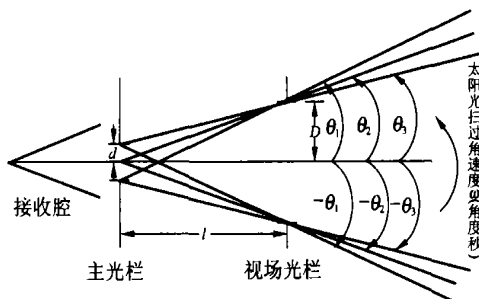


图 1 绝对辐射计视场
Fig. 1 The field of view of the absolute radiometer

辐射计的主光栏半径为 d , 视场光栏的半径为 D , 它们之间的距离为 l , 那么如图 1 所示,可

以定义 θ_1, θ_2 和 θ_3 3 个视场半角,分别为:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{D+d}{l}, \tag{1}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{D}{l}, \tag{2}$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{D-d}{l}. \tag{3}$$

θ_1 : 称全视场,也就是从 θ_1 角太阳光刚开始入射辐射计;

θ_2 : 称半强度视场 (Opening Half Angle), 也就是太阳光在这一视场角被遮拦一半入射;

θ_3 : 称无遮拦视场 (slop angle), 也就是在这一视场角以内太阳光是全部入射辐射计。

图 2 表示了辐射计视场上太阳越过时的功率。

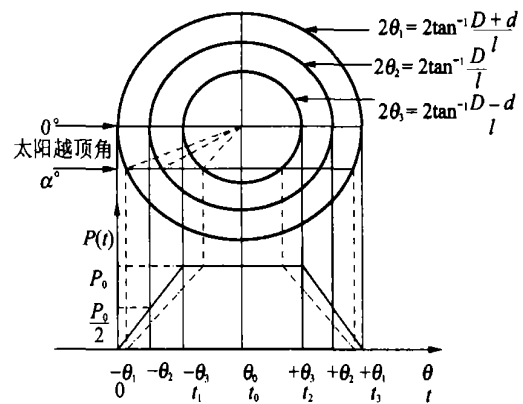


图 2 辐射计视场上功率变化

Fig. 2 The change of power on the field of view of the absolute radiometer

当太阳光从辐射计视场 $-\theta_1$ 到 $+\theta_1$ 越过时,通过主光栏后面辐射计黑体腔接收的辐射功率为主光栏平面和视场光栏平面同垂直于太阳光线平面上的投影上主光栏和视场光栏这两个圆盘重叠部分的面积乘上太阳辐照度。这一辐射功率在太阳越过时随 θ 的变化函数 $P(\theta)$ 的严密表达式是复杂的^[7],但近似可表示为如图 2 所示的梯形。指向太阳安装的绝对辐射计,视场上太阳光越过的轨迹,对极轨道卫星来说实际上是卫星飞行角速度 ω 和同它垂直方向地球自转角速度 $\omega_0 = 15.7 \text{ }^\circ/\text{h} = 0.25 \text{ }^\circ/\text{min}$ 的合成角速度, $\omega = \omega + \omega_0$ 。因此,太阳矢量与轨道面的夹角为 0 时太阳光并不从辐射计视场中心扫过,偏离 $\omega_0 \times \frac{l}{\omega}$ (对风

云 3 号而言, $0.259 \text{ min} \times \frac{17.2}{3.569 \text{ min}} = 1.29$, 也就是太阳矢量与轨道面夹角为 $\theta = 1.29$ 时才从辐射计视场中心越过(对其他倾斜角 θ 飞行的卫星,这一角应为 $\theta \sin \alpha$)。本文讨论中以越过辐射计视场中心时的越顶角 $\theta = 0$ 扫过时 $P(\theta)$ 为图 2 实线梯形,以一定越顶角 θ 扫过时 $P(\theta)$ 为图 2 虚线梯形所示。

但是,由于太阳光扫过时光线同辐射计光轴产生夹角 θ ,所以经主光栏(它同光轴是垂直的)后被辐射计腔接收的辐射又变小 $\cos \theta$ 。因此,腔实际接收的辐射功率为 $P(\theta) \cos \theta$ 。

卫星的轨道周期为 $T(s)$ 时,它的飞行角速度 $\omega = 360^\circ / T(\text{角度}/s)$ 。那么可以把太阳越过绝对辐射计视场角的 θ 坐标换成时间坐标 t ,以太阳光刚入射辐射计的 $\theta = -\theta_1$ 为时间坐标的零点,依次求出太阳越过 $-\theta_2^\circ, -\theta_3^\circ, -\theta_0^\circ, +\theta_3^\circ, +\theta_2^\circ, +\theta_1$ 的时间为 $t_1/2, t_1, t_0, t_2, t_3$ 。把太阳光功率的变化函数变换成时间的函数 $P(t)$ 。考虑到辐射功率的因子以后,梯形函数就变成如图 3 所示的菱梯形。

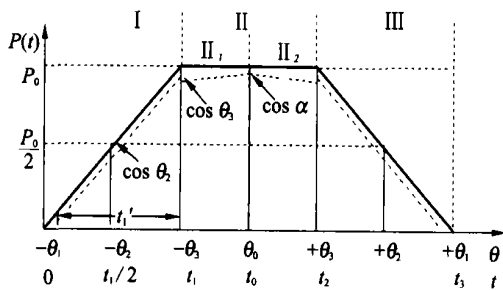


图 3 $P[t]$ 函数
Fig.3 Function of $P[t]$

$P(t)$ 函数,如果不考虑 $\cos \theta$ 因子就如图所示的梯形实线,如果考虑 $\cos \theta$ 因子就如图中虚线。

$P(t)$ 函数,分 I 、 II_1 、 II_2 和 III 四个时段描述。当 θ 角不大时, $\cos \theta_1 - \cos \theta_3$ 的变化可以近似为线性变化,即 $\frac{\cos \theta_3 - \cos \theta_1}{t_1} t$ 。例如: $\theta_1 = 17.2^\circ$, $\theta_3 = 9.3$ 时, $\cos \theta_3 - \cos \theta_1 = 0.9869 - 0.9552 = 0.032$ 是很小的量,可以用线性函数近似表达。

当太阳是以 θ 越顶角扫过辐射计视场时, I 时段 $(0 - t_1)$ 的 $P(t)$ 可表示为:

$$P(t) = \left(P_0 \cos \theta_3 - \frac{P_0}{2} \cos \theta_2 \right) \left(\frac{t_1}{2} \right)^{-1} \times t$$

但是,这时 t_1 变短为 t_1 (从图中可看出)

$$t_1 = \frac{t_1}{2} + \frac{t_1}{2} \cos \theta_2 / (2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2) = \frac{t_1}{2} \left(\frac{\cos \theta_2}{2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2} + 1 \right) = \frac{t_1}{2} \left(1 + \frac{\cos \theta_2}{2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2} \right)$$

把 $P(t)$ 整理后得:

$$I: (0 - t_1)$$

$$P(t) = \frac{P_0}{t_1} (2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2) t = \frac{P_0}{t_1} t, \quad (4)$$

式中 $\theta_1 = 2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2$

$$II_1: (t_1 - t_0)$$

$$P(t) = P_0 \cos \theta_3 \left[1 + \frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_3}{t_0 - t_1} (t - t_1) \right]$$

$$= P_0 \cos \theta_3 + P_0 \cos \theta_3 \frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_3}{t_0 - t_1} (t - t_1)$$

$$= P_0 \cos \theta_3 + \frac{P_0}{t_0} \cos \theta_3 (\cos \theta_2 - \cos \theta_3) (t - t_1)$$

$$= P_0 \cos \theta_3 + \frac{P_0 \cos \theta_3}{t_0} \theta_2 (t - t_1), \quad (5)$$

式中 $\theta_2 = \cos \theta_2 - \cos \theta_3$, $t_0 = t_0 - t_1$

$$II_2: (t_0 - t_2)$$

$$P(t) = P_0 \cos \theta_3 - \frac{P_0 \cos \theta_3}{t_0} \theta_2 (t - t_0), \quad (6)$$

式中 $\theta_2 = \cos \theta_2 - \cos \theta_3$

$$III: [t_2 - (t_2 + t_1)]$$

$$P(t) = P_0 \cos \theta_3 - \frac{P_0}{t_1} (2 \cos \theta_3 - \cos \theta_2) (t - t_2) =$$

$$P_0 \cos \theta_3 - \frac{P_0}{t_1} \theta_1 (t - t_2), \quad (7)$$

$$III:$$

$$P(t) = 0, \quad (8)$$

如果忽略辐照度随入射角的余弦变化,即 $\cos \theta = 1$, $P(t)$ 函数为图 2 实线那样的梯形函数,则有:

$$I: (0 - t_1)$$

$$P(t) = P_0 \frac{1}{t_1} t, \quad (9)$$

$$II: (t_1 - t_0 - t_3)$$

$$P(t) = P_0, \quad (10)$$

$$III: (t_2 - t_3)$$

$$P(t) = P_0 - P_0 \frac{1}{t_1} (t - t_2) = P_0 + P_0 \frac{t_2}{t_1} - P_0 \frac{1}{t_1} t, \quad (11)$$

$$III: (t_3 - t_1)$$

$$P(t) = 0, \quad (12)$$

当太阳的越顶角为 θ 时, P_0 改为 $P_0 \cos \theta$ 即可。

神舟 3 号飞船及其绝对辐射计为例: $D = 13 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$, $l = 100 \text{ mm}$, 则有:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \tan^{-1} \frac{D+d}{l} = \tan^{-1} \frac{17}{100} = 9.64^\circ \\ \alpha_2 &= \tan^{-1} \frac{D}{l} = \tan^{-1} \frac{13}{100} = 7.4^\circ \\ \alpha_3 &= \tan^{-1} \frac{D-d}{l} = \tan^{-1} \frac{9}{100} = 5.14^\circ \end{aligned}$$

神舟 3 号飞船的轨道周期 $T = 90 \text{ min}$, 那么它的角速度 为:

$$= \frac{360^\circ}{90 \text{ min}} = 4^\circ \text{ min} = 0.06667^\circ \text{ s}$$

风云 3 号卫星及其绝对辐射计为例: $D = 13 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$, $l = 55 \text{ mm}$, 则有:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \tan^{-1} \frac{D+d}{l} = \tan^{-1} \frac{17}{55} = 17.2^\circ \\ \alpha_2 &= \tan^{-1} \frac{D}{l} = \tan^{-1} \frac{13}{55} = 13.3^\circ \\ \alpha_3 &= \tan^{-1} \frac{D-d}{l} = \tan^{-1} \frac{9}{55} = 9.3^\circ \end{aligned}$$

风云 3 号卫星的轨道周期 $T = 101.6 \text{ min}$, 那么它的角速度 为:

$$= \frac{360^\circ}{101.6 \text{ min}} = 3.543^\circ \text{ min} = 0.05906^\circ \text{ s}$$

太阳越顶角分别为 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 5$ 时从 α_1 角度为 $t = 0$, 太阳越过其他视场的时间分别列表入表 1。

表 1 太阳越过视场的角度及时间表

Tab. 1		The angle and time when the sun flies over the FOV		
		太阳越顶角		
t		风云 $\alpha = 0^\circ$	神舟 $\alpha = 0^\circ$	风云 $\alpha = 5^\circ$
- 1	0	- 17.2° $t = 0$	- 9.64° $t = 0$	- 16.45° $t = 0$
- 2	$\frac{t_1}{2}$	- 13.3° 66	- 7.4° 33.6°	- 12.3° 70.0
- 3	t_1	- 9.3° 133.8	- 5.14° 67.2	- 7.84° 145.0
0	t_0	0° 292.3	0° 144.6	0° 277
+ 3	t_2	+ 9.3° 448.8	+ 5.14° 221.7	+ 7.84° 409
+ 2		+ 13.3° 516.5	+ 7.4° 255.6°	+ 12.3° 484
+ 1	t_3	+ 17.2° 582.5	+ 9.64° 289.2	+ 16.45° 554

风云:

$$t_1 = \frac{t_1}{2} \left(1 + \frac{\cos \alpha_2}{2 \cos \alpha_3 - \cos \alpha_2} \right) = 131.2 \text{ (对 } \alpha = 0^\circ \text{)}$$

对 $\alpha = 0^\circ$ $t_1 = 133.8$ $t_1 = 131.2$
 对 $\alpha = 5^\circ$ $t_1 = 145^\circ$ $t_1 = 143$
 $\alpha_1 = 2 \cos \alpha_3 - \cos \alpha_2 = 1.0185$
 $\alpha_2 = \cos \alpha_3 - \cos \alpha_2 = 1 - \cos \alpha_3 = 0.01314$

3 辐射计腔温的响应函数

太阳在辐射计视场越顶扫描时, 绝对辐射计接收的太阳辐射 $P(t)$ 是在如图 2、3 所示那样的时间变化的情况下, 求出辐射计腔温响应函数。

在绝对辐射计接收腔上入射的太阳光功率的同时, 如图 4 所示那样, 加电功率 P_L , 未接收太阳光功率时初始条件 $T_H = \frac{P_H}{K}$ ($t = 0$ 时) 情况下, 求出 $T(t)$ 。

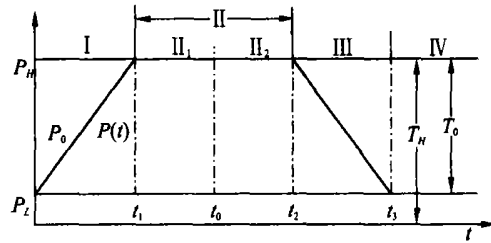


图 4 绝对辐射计接收腔上所加功率示意图

Fig. 4 The sketch map of power on the cavity of the absolute radiometer

也就是绝对辐射计的快门未打开时, 电加热功率 P_H , 腔温处在 $T_H = P_H/K$ 的状态; 当太阳光 $P(t)$ 入射的同时加一个 $P_L = P_H - P_0$ 的电功率, P_0 为太阳光全照射时的辐射功率。腔温响应 $T(t)$ 的时间变化情况可通过解绝对辐射计热力学微分方程获得:

$$C \frac{dT(t)}{dt} + KT(t) = P_L + P(t)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{K}{C} T(t) = \frac{1}{C} [P_L + P(t)], \quad (13)$$

式中: C 是腔的热容, K 是腔的热传导率; $\tau = C/K$ 是时间常数。

初始条件: 当 $t = 0$ 时 $T_H = T(t = 0) = \frac{P_H}{K}$,

方程式(13)的通解为:

$$T(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \frac{1}{C} [P_L + P(t)] e^{\frac{t}{\tau}} dt + b \right\}, \quad (14)$$

把忽略辐照度余弦变化 ($\cos \alpha = 1$) 的近似功

率函数(9)、(10)、(11)、(12)式代入(14)后得到
的腔温响应函数

$$T(t) = \frac{P_L}{K} - \frac{P_H - P_L}{K} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} \left[t - \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right], \quad (15)$$

$$T(t) = \frac{P_L}{K} - \frac{P_H - P_L}{K} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} \left[t_1 - \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right), \quad (16)$$

$$T(t) = \frac{P_L}{K} + \frac{P_H - P_L}{K} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} \left[t_1 - \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right) - \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} \left[(t-t_1) - (t_2-t_1) e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right] + \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} t_2 \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right), \quad (17)$$

$$T(t) = \frac{P_L}{K} + \frac{P_H - P_L}{K} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} \left[t_1 - \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right) \right] e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} + \frac{P_0}{K} \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right) - \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} \left[(t_3-t_1) - (t_2-t_1) e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right] + \frac{P_0}{K} \frac{1}{t_1} t_2 \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right) e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}, \quad (18)$$

考虑辐照度余弦变化 \cos 时,把式(4)、(5)、(6)、(7)、(8)代入式(14)后得到腔温响应函数。由于表达式繁复,从略。因为 \cos 因子很小,这 2 个响应函数的偏差不大,用公式(15)-(18)的响应函数足以研究宽视场辐射计中太阳光辐射的响应情况。

图 5 是对风云 3 号卫星上的情况计算的腔温响应函数 $T(t)$ 曲线。

在神舟 3 号飞船上实际测得的腔温响应曲线如图 6 所示。

它们都表明:太阳越过辐射计视场时接收腔上辐射功率恒定的那一段期间(对风云:133.8 - 448.8,对神舟:67.2 - 221.7)腔温响应能够达到平衡,其快慢决定于辐射计的时间常数。神舟

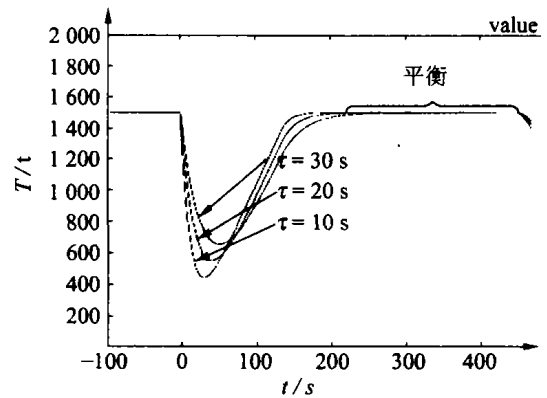


图 5 风云 3 号卫星太阳辐照度监测仪腔温响应函数 $T(t)$ 曲线

Fig. 5 The curve of temperature response function $T(t)$ of cavity of solar irradiance monitor on FY-3 satellite

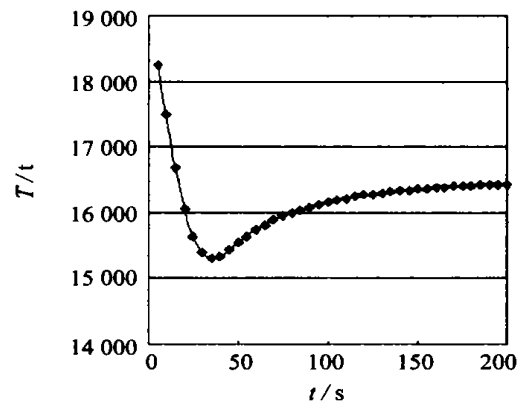


图 6 神舟 3 号飞船上实际测得的腔温响应曲线

Fig. 6 The curve of temperature response obtained on Shenzhou-3 spacecraft

3 号飞船太阳常数监测器上的辐射计的时间常数为 $\tau = 30$ s,在太阳光入射后 200 s 左右达到平衡进行测量的。我们可以选择这时间作为观测阶段,达到腔温响应的平衡温度后,关闭快门进行电定标就能够测得太阳辐照度数据。当然考虑辐照度余弦变化和越顶角,还要对数据进行修正。

4 结 论

在神舟 3 号飞船太阳常数监测器上用 3 个扇型排列的半强度视场为 7.5 的绝对辐射计,用这种方法测得的太阳辐照度折算成太阳常数后与同期(2002 年 3 月至 9 月)美国 EOS 卫星上的

ACRIM- 测量获得的数据一致。

理论分析和飞船测量结果都证明:这种用指向太阳安装的宽视场绝对辐射计在太阳越顶扫过

其视场期间,不跟踪太阳进行测量的方法是可行的。因此在风云 3 号卫星太阳辐照度监测仪上也应用了这种测量方法。

参考文献:

- [1] 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.
FANG W, YU B X, YAO H SH, *et al.* Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1):112-116. (in Chinese)
- [2] 方伟,禹秉熙. 空间绝对辐射测量技术[C]. 纪念建所 50 周年(1952-2002)论文及论文摘要汇编,2002:129-147.
FANG W, YU B X. *Absolute radiation measurement technology on space*[D]. Symposium of the Theses and the Theses Abstracts for Fifty Anniversary of the Institute, 2002:129-147. (in Chinese)
- [3] 禹秉熙,方伟,姚海顺,等. 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.
YU B X, FANG W, YAO H SH, *et al.* Solar irradiance measurement on shenzhou-3 spacecraft[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, 24(2):119-123. (in Chinese)
- [4] 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.
FANG W, YU B X. A new method of measuring solar constant on polar-orbit satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(4):241-245. (in Chinese)
- [5] 方伟,禹秉熙,姚海顺,等. 星载太阳辐照度监测仪(STIM)[C]. 第 11 届全国遥感技术学术交流会论文集,1999:65-66.
FANG W, YU B X, YAO H SH, *et al.* STIM on satellite[C]. *The Eleventh National Symposium on Remote Sensing Technology*, 1999:65-66. (in Chinese)
- [6] 方伟,禹秉熙,姚海顺,等. STIM 研制[J]. SPIE,2003,4895:218-224.
FANG W, YU B X, YAO H SH, *et al.* Development of STIM[J]. *SPIE*, 2003, 4895:218-224. (in Chinese)
- [7] 石磊. 太阳常数的变角测量方法的初步研究[D]. 长春光学精密机械与物理研究所,1996.
SHI L. *The pilot study on non-tracking method*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Science, Changchun, 1996. (in Chinese)

作者简介:禹秉熙(1938-),男,辽宁新宾县人,1962年毕业于吉林大学物理系,一直在长春光学精密机械与物理研究所工作,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间遥感仪器研制工作。