

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0027 - 04

# 地球反照辐射对太阳探头影响的研究

夏项团, 朱进兴, 刘学明, 龚惠兴

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 太阳探头响应的能量是太阳可见光辐射。在卫星轨道, 地球大气和表面产生的反射光照也能进入太阳探头的视场。针对风云一号 C 星和风云三号气象卫星, 综合考虑了卫星发射的窗口、轨道、大气漫反射和太阳直射等因素, 从理论上分析和推算了太阳探头响应地表及大气反照的各种结果, 并作为风云一号 C 星姿控系统复核复算的依据, 也可作为风云三号卫星姿控系统提供参考。

**关键词:** 太阳探头; 地面反照; 镜面反射; 漫反射

**中图分类号:** V423.4<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A

## INFLUENCE OF EARTH RADIATION ON SUN SENSOR

XIA Xiang-Tuan, ZHU Jin-Xing, LIU Xue-Ming, GONG Hui-Xing

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The sensitive energy of sun sensor is visible light's radiate from sun. In the satellite orbit, the radiation from earth's atmosphere and surface can also come into the sun sensor's field of vision. Based on the FengYun No. 1 C and No. 3 weather satellite, various influences of earth radiation on sun sensor were theoretically analysed and calculated after considering the factors of satellite's launching time and orbit, as well as atmosphere diffuse reflection and sun's irradiation. The research result is the foundation of FengYun No. 1 C satellite's gesture controlling system check, and it can also provide reference to FengYun No. 3 satellite.

**Key words:** sun sensor; earth radiation; specular radiation; atmosphere diffuse reflection

### 引言

风云一号 C 星和风云三号气象卫星红外地平仪系统增加独立的可见光光路的太阳探头装置, 用来敏感太阳辐射, 以消除太阳辐射对红外地平仪的干扰。太阳探头是环形狭缝直射式结构, 选用对可见光敏感的硅光电池片作为探测元件, 工作响应光谱波段为  $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ , 接近太阳光谱。太阳探头实际可见光视场范围为  $55^\circ \pm 5^\circ$  方位角  $40^\circ$  的两段对称局部锥形圆环。在这局部圆环区域内可见光视场覆盖地平仪圆锥扫描红外瞬时视场。因此, 在上述区域内总是太阳敏感器先于红外地平仪探头观测到太阳辐射, 用太阳敏感器的输出信号控制红外地平仪输出姿态的有效性, 达到消除太阳辐射对红外地平仪干扰的目的。

根据太阳探头的工作原理, 只要可见光辐射使

光敏元件产生的信号值大于其本身所设定的门限值, 太阳探头即指示太阳进入。在外层空间, 除了太阳以外, 还有其它发光星球和反光体。当外层空间其它发光星球和反光体, 以及地球表层的反照辐射进入太阳探头视场后, 光敏元件也将产生信号, 这种信号就为干扰信号。干扰信号如果大于太阳探头的阈值, 将输出错误的太阳信号进入地平仪红外视场指示信号。由于外层空间其它发光星球和反光体的信号远比地球表层反照辐射弱, 本文就地球表层反照辐射干扰信号的数值、出现几率等情况进行研究。

在设计中, 根据定标结果及误差分析, 干扰信号必须低于太阳探头响应太阳可见光辐射信号的 80% 为阈值。

### 1 总体情况分析

地表反射阳光在外层空间产生的辐照度由镜面

收稿日期: 2007 - 04 - 21, 修回日期: 2007 - 12 - 18

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10734090)

作者简介: 夏项团 (1969-), 男, 安徽当涂人, 中国科学院上海技术物理研究所研究员, 博士研究生, 主要从事卫星姿态测量系统、航天红外光电遥感仪器等方面的研究。

Received date: 2007 - 04 - 21, revised date: 2007 - 12 - 18

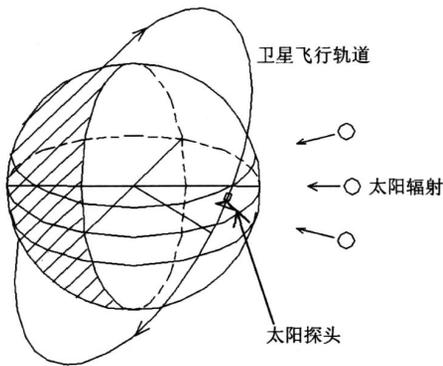


图 1 卫星绕地球飞行  
Fig 1 Satellite flying around earth

反射照度和漫反射照度组成<sup>[1,2]</sup>. 地球镜面反射阳光照度与轨道高度,地面镜面反射率,地表作为凸面镜入射阳光的发散程度及阳光二次穿过大气时的大气透明度等因素有关. 我们以地球表面的耀斑如海平面等为例,分析最大镜面反照情况;漫反射照度主要取决于云层的反射率,大气散射率等因素;太阳探头响应漫反射照度的情况比较复杂,其数值视卫星飞行的轨道情况有较大的变化.

图 1 为卫星绕地球飞行的示意图. 地球受到照射的太阳光线近乎平行,因此它总是半明半暗,地球反照对于太阳探头工作的干扰,应在太阳探头视场包含地球向阳部分时发生. 根据卫星的发射窗口及轨道情况得知:卫星下行时,大部分时间视场能够包含地球向阳面,安装于卫星飞行方向的太阳探头主要在这部分时间受地球反照影响;卫星上行时,太阳探头视场大部分时间只能面对地球的背阳面,此时没有地球可见光反照辐射,所以分析中对卫星飞行的这段时间不予考虑.

太阳总是在南、北回归线之间移动,这部分地球表面可以受到太阳的直射,受太阳直射区域产生的反照辐射度大于地球其它表面的反照辐射度. 因此,对于漫反射的分析计算主要针对太阳探头面对地球南北回归线之间的区域进行.

### 2 镜面反射辐射影响的估算

地球镜面反射阳光照度与卫星轨道高度  $h$ ,地面镜面反射率,地表作为凸面镜对入射阳光的发散程度及阳光二次穿过大气时的大气透明度等因素有关<sup>[3-5]</sup>. 其计算式如下:

$$Q_{\text{镜}} = \frac{1}{2} H_0 \cdot \tau_0^{2m} \cdot \left[ \frac{\sin^2(i - i_1)}{\sin^2(i + i_1)} + \frac{\text{tg}^2(i - i_1)}{\text{tg}^2(i + i_1)} \right]$$

$$\cdot \frac{R^2 \cos^2 i}{(R \cos i + 2l)(R \cos i + 2l \cos^2 i)}, \quad (1)$$

式中  $H_0$  是工作波段内的太阳辐射照度,  $\tau_0$  是单位大气质量的透过率,  $i$  是阳光的入射角,  $R$  是地球半径.

$$i_1 = \sin^{-1} \left[ \frac{1}{n_1} \sin i \right]$$

$$l = \frac{\sin(i - i_1)}{\sin i} (R + h), \quad (2)$$

$$= \sin^{-1} \left[ \frac{R}{R + h} \sin i \right]$$

其中,  $n_1$  是镜面物质的折射率.

设地表的镜面反射由平静的水面引起,其折射率  $n_1 = 1.33$  为了估算最大镜面反射照度,设太阳探头工作波段内  $\tau_0 = 0.85$ ,  $i = 72^\circ$ ,  $h = 870$  公里时,求得最大反射阳光照度  $W_2 = 3.18 \times 10^{-2} H_0$ .

### 3 地表漫反射照度影响的分析

地球漫反射对太阳探头的影响取决于其可见光视场覆盖地球大气层的区域. 为了计算该区域,我们建立图 2 所示的坐标系<sup>[7,8]</sup>.

图 2 中,圆锥体为视场角  $\theta$  的可见光响应发散视场;  $R = 6371.03 \text{ km}$  是地球半径,  $h = 870 \text{ km}$  是轨道高度,  $r$  是圆锥体底面圆的半径,  $\alpha$  是滚动角,  $\beta$  是俯仰角偏差.

$K$  点是圆锥和球体在纸面平面里的交点. 直线  $MN$  模拟太阳探头视场扫描线. 求出其与地球的交点,即可确定图 3 所示的地球辐射区域. 图 2 中,直线  $MN$  的方程为:

$$\frac{x}{r \cos \alpha} = \frac{y - (R + h)}{- (MP \sin \alpha + r \cos \alpha \sin \beta)}$$

$$= \frac{z}{MP \cos \alpha - r \sin \alpha \sin \beta} = t. \quad (3)$$

与球体方程  $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$  联立求交点  $J$  的坐标.

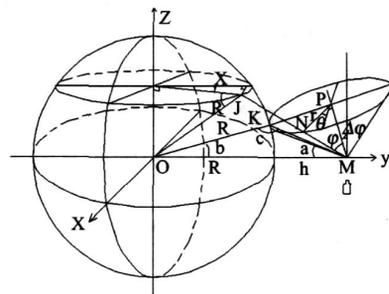


图 2 太阳探头视场扫描坐标系  
Fig 2 The reference frame of sun sensor's fields of vision

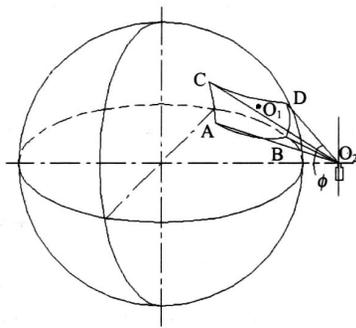


图 3 太阳探头发散视场  
Fig 3 Sun sensor's diffuse fields of vision

采用立体几何的方法,求得卫星在俯仰角偏差、滚动角偏差 ( =0, =0为正常姿态)的姿态下,太阳探头一侧看到地球表面的区域,如图 3 中的区域  $ABDC$  所示. 图中,  $AB$ — $60^\circ$  视场角与地球的交线;  $CD$ — $50^\circ$  视场角与地球的交线; 是太阳探头接收地球反照的立体角.

区域  $ABDC$  的面积是:

$$S_{ABDC} = R^2 \cdot \angle AOB \cdot \angle AOC \quad (4)$$

其中:

$$\cos(\angle AOB) = \frac{x_A x_B + y_A y_B + z_A z_B}{\sqrt{x_A^2 + y_A^2 + z_A^2} \cdot \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}}$$

$$\cos(\angle AOC) = \frac{x_A x_C + y_A y_C + z_A z_C}{\sqrt{x_A^2 + y_A^2 + z_A^2} \cdot \sqrt{x_C^2 + y_C^2 + z_C^2}} \quad (5)$$

为了估算区域  $ABDC$  可能产生的最大反射照度,我们假设地球是漫反射体,区域  $ABDC$  被浓厚的云层覆盖,其反射率取最大值 0.9;太阳探头工作波段内的太阳辐射照度为  $H$ .

根据朗伯定律,区域  $ABDC$  在受到太阳辐照时,其表面的亮度  $L$  为

$$L = \frac{H}{\pi} \cos \theta \quad (6)$$

式中  $\rho$  是地球表明漫反射率;  $\Omega$  是区域  $ABDC$  面的太阳入射角.

在太阳探头上产生的辐射能  $Q_1$

$$Q_1 = L \cdot \Omega \cdot \cos \alpha = \frac{H}{\pi} \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha \cdot \Omega \quad (7)$$

式中  $\alpha$  是太阳探头光敏面入射角;  $\Omega$  是可见光视场对地球反照辐射的立体角;  $H$  是太阳探头工作波段内的太阳辐射照度.

至此,我们推算出太阳探头一侧视场接收的地球反照辐射能  $Q_1$ . 运用同样的方法,可以求出太阳

探头另一侧视场接收的地球反照辐射能  $Q_2$ . 分析原理图 1 可知:卫星轨道另一侧地球区域太阳入射角必然大于区域  $ABDC$  的太阳入射角. 因此  $Q_2 < Q_1$ . 为了增加计算结果的裕度,我们取  $Q_2 = Q_1$ . 那么,太阳探头接收地球漫反照总辐射能  $Q_{漫}$  为:

$$Q_{漫} = Q_2 + Q_1 = \frac{2 \cdot H}{\pi} \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha \cdot S_{光敏面} \quad (8)$$

### 4 计算结果

根据以上理论分析,综合考虑地球镜面反射照度和地球大气漫反射照度在太阳探头视场内产生的辐射能量:  $Q_{地} = Q_{镜} + Q_{漫}$ . 根据朗伯定律,辐照度为  $H$  的太阳光均匀照射太阳探头光敏后,产生的辐射能  $Q_{太}$  为:  $Q_{太} = H \cos 55^\circ \cdot S_{光敏面}$

由于可见光敏感器的电信号与光辐射能成正比,所以对于太阳探头来讲,地面反照产生的信号与工作峰值信号的比值  $K$  (简称地面反照系数)为:

$$K = Q_{地} / Q_{太} \cdot 100\% \quad (9)$$

卫星正常姿态时地面反照情况数据如下表所示:

表 1 卫星正常姿态时地面反照情况数据表  
Table 1 The earth radiation datum at different season in case of satellite normal position

年历节气	太阳直射地球点纬度 (°)	最大反照系数 $K$ (%)	卫星所处的地球纬度 (°)
1 小寒	19.58	20.19	12.69
2 大寒	南 15.67	22.30	16.55
3 立春	11.75	24.41	20.43
4 雨水	纬 7.83	25.91	24.30
5 惊蛰	3.92	26.82	28.16
6 春分	赤道 0	27.12	32.03
7 清明	3.92	27.42	35.91
8 谷雨	7.83	27.42	39.78
9 立夏	11.75	27.72	43.65
10 小满	15.67	27.72	47.52
11 芒种	北 19.58	28.02	51.39
12 夏至	23.5	28.32	55.26
13 小暑	19.58	28.02	51.39
14 大暑	纬 15.67	27.72	47.52
15 立秋	11.75	27.72	43.65
16 处暑	7.83	27.42	39.78
17 白露	3.92	27.42	35.91
19 寒露	赤道 0	27.12	32.03
18 秋分	3.92	26.82	28.16
20 霜降	7.83	25.91	24.30
21 立冬	南 11.75	24.41	20.43
22 小雪	纬 15.67	22.30	16.55
23 大雪	19.58	20.19	12.69
24 冬至	23.5	17.17	8.81

计算结果表明:卫星处于正常飞行姿态时,由于卫星轨道情况,在夏至太阳直射北回归线时,太阳相应地球可见光反照辐射为峰值,最大反照系数  $K$  可达 30%。因此,太阳探头响应地球可见光反照辐射产生的反照信号,不会大于其响应太阳光直射辐射产生的峰值信号的 30%。因此,太阳探头响应地面反照辐射不会输出错误信号。

## 5 卫星在轨飞行验证

运用本文的理论分析,对风云一号卫星红外地平仪系统太阳探头进行了实际计算。从 1999 年 5 月 10 日卫星发射入轨以来,卫星姿态运行正常,红外地平仪工作正常。这充分证明了本文对地面辐射干扰源影响的理论分析计算是正确可靠的。风云三号气象卫星使用了同样的太阳探头来对红外地平仪视场进行保护,本文的理论分析和风云一号气象卫星在轨运行的实际结果可以给风云三号太阳探头的运行提供依据。

## REFERENCES

- [1] Martin V Zmbeck. *Handbook of space astronomy and astrophysics* [M]. Beijing: Science Press (宗贝克 M. V. 空间天文学和天体物理学手册. 北京: 科学出版社), 1987.
- [2] LI Qing-Li, XUE Yong-Qi, WANG Jian-Yu, *et al* Atmospheric correction of PHI hyperspectral imagery [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李庆利, 薛永祺, 王建宇, 等. PHI 高光谱图像的大气校正算法. 红外与毫米波学报), 2006, 25 (4): 316—320.
- [3] WANG Yan-Ming. *Atmospheric physics* [M]. Shandong: Qingdao Ocean University Press (王衍明. 大气物理学. 山东: 青岛海洋大学出版社), 1993.
- [4] Shun Lin-Liang, Hong Liang-Fang. An improved atmospheric correction algorithm for hyperspectral remotely sensed imagery [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, 1 (2): 112—117.
- [5] Jean Meeus. *Astronomical Algorithms* [M]. Virginia, Willmann-Bell Inc Richmond, 1991, 71.
- [6] Gong Hui-Xing. An background noises characteristic estimate about outer space sun sensor [J]. *Infrared Physics and Technology*, (龚惠兴 外层空间太阳敏感器背景干扰特性的估计. 红外物理与技术), 1978, 5.
- [7] Edgar W Woolard, Gerald M Clemence. *Sphere Astronomy* [M]. Beijing: Topography Press (伍拉德 E.W. 克莱门斯 G.M. 球面天文学. 北京: 测绘出版社), 1984.
- [8] HUANG Jing, Q U Chong-Jian, ZHANG Yan-Wu. Statistical method for retrieving the clear atmospheric parameters from satellite infrared measurement [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄静, 邱崇践, 张艳武. 一种利用卫星红外遥感资料反演晴空大气参数的物理统计方法. 红外与毫米波学报), 2007, 26 (2): 102—106.
- [7] Barducci A, Pippi I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the "gray body emissivity" method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34 (3): 681—695.
- [8] Gillespie A R, Matsunaga T, Rokugawa S, *et al* A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36 (4): 1113—1126.
- [9] Borel C C. Surface emissivity and temperature retrieval for a hyperspectral sensor [J]. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1998, 1: 546—549.
- [10] ZHU Shan-You, ZHU Xun, YN Qiu, *et al* Modification of temperature and emissivity separation model and its sensitivity analysis [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (祝善友, 朱迅, 尹球, 等. 温度与发射率分离模型的改进与其敏感性分析. 红外与毫米波学报), 2006, 25 (1): 71—76.
- [11] Payan V, Royer A. Analysis of temperature emissivity separation (TES) algorithm applicability and sensitivity [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (1): 15—37.

(上接 26 页)