

天体对卫星红外地球敏感器干扰的研究^{*}

李于衡 李建勇

(西安卫星测控中心 西安 710043)

摘 要

我国在轨运行的卫星多次因红外地平仪受天体的干扰而出现姿态异常的情况。本文介绍了各种红外地平仪工作原理,分析了它们受干扰的原因,给出了精确预报的方法,并在此基础上提出了相应的抗干扰措施,有些已成功运用到在轨运行的卫星上。

关键词 红外地平仪; 卫星姿态

1 引言

红外地球敏感器又称红外地平仪,是各种卫星姿控系统的重要部件,其性能的好坏和工作稳定性直接影响到卫星的整星安全。作为姿态测量部件,在卫星设计中得到了广泛应用,从低轨地球资源观测卫星到高轨同步通信卫星,无不使用它作为卫星的俯仰和滚动姿态角的测量部件。由于红外会受到天体的干扰,如果在设计上没有充分考虑其影响,将会对卫星姿态造成重大影响,甚至卫星无法正常使用。本文介绍了各种红外地平仪的原理,分析了它们受星体干扰的原因,并给出了各种应对措施。

2 红外地平仪工作原理

红外地平仪是借助于对红外辐射的敏感,获取航天器相对于地球的姿态信息的光学敏感器,它以 $14\sim 16\mu\text{m}$ 的 CO_2 吸收带作为工作频带,稳定地敏感地球轮廓和辐射强度。由于太空的背景温度接近 4 K,地球表面的平均等效黑体温度约为 230 K,当地平仪瞬时视场由太空扫向地球,以及由地球扫向太空时,地平仪接收到的辐射能量发生了两次跃变,这一能量跃变经过热敏探测器转化为反映姿态的电信号跃变^[1]。

红外地平仪主要由光学系统、探测器和处理电路组成。它分为穿越式和辐射平衡式两大类,具体有圆锥扫描式、摆动扫描式和辐射热平衡式 3 种类型。

2.1 圆锥扫描式地平仪

圆锥扫描式地平仪发展较早,应用也较多。它是利用地球和空间红外辐射的不连续性工作的,工作原理如图 1 所示。由磁滞同步电路带动折射双反射镜进行圆锥扫描,一般机械转轴夹角设计为 55° ,光学视场为 1.5° 。扫描圆锥与地球表面的交线为红外地平仪扫描地球的路径,在地球边缘的交点为光轴的扫入点(A点)和扫出点(B点)。当地平仪从地球边缘向中心扫过时,信号强度逐渐增加。在实际使用中,扫入脉冲和扫出的上升沿的形成

2003-06-30 收到原稿, 2003-10-10 收到修定稿

是在辐射信号的绝对值或积分值达到一定门限后形成的. 在地平仪与基座之间各装有一个磁基准, 每旋转一圈, 磁基准相遇一次, 触发一基准脉冲. 卫星上天前, 地面标定当卫星俯仰和滚动角为 0° 时, 磁基准脉冲指向地心. 无姿态偏差时, 磁基准脉冲正好位于地球方波中心; 当卫星姿态出现偏差时, 红外地平仪的磁基准脉冲将偏离地球方波中心. 一般来说, 一个红外地平仪能够反映两个方向的姿态. 以测俯仰角的地平仪为例, 它的左、右弦宽的差值反映俯仰姿态角的值; 其整个弦宽的变化还反映出滚动方向的姿态角偏差. 测量滚动姿态角的地平仪亦同, 因此在实际卫星应用中, 它们相互备份.

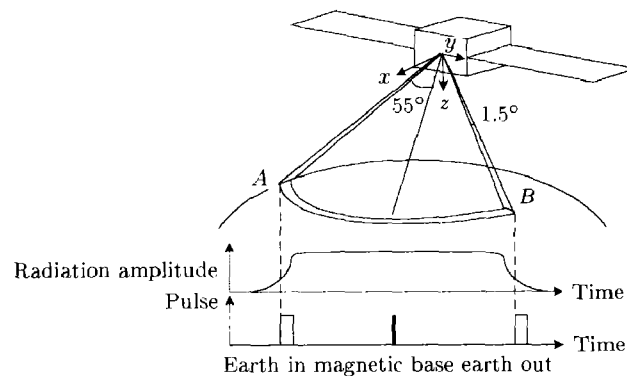


图 1 圆锥扫描式红外地平仪工作原理

Fig.1 The principle of conic scanning infrared earth sensor

圆锥扫描式红外地平仪的优点是扫描视场响应时间较短, 对许多飞行任务适应性较强, 特别是对大范围姿态测量和姿态机动捕获更为合适, 其精度较高. 但由于存在运动扫描机构, 因此其使用寿命受到限制. 主要用于寿命较短的近地卫星, 如我国 Fy-1 气象卫星; 也可以应用于同步自旋卫星, 这时地平仪固定在星体上, 由星体转动进行扫描, 如我国的 Fy-2 气象卫星.

2.2 静态红外地平仪

静态红外地平仪又称辐射热平衡式地球敏感器, 静态地平仪安装在卫星的对地面, 由 $14\text{--}16\mu\text{m}$ 的带通滤光片和 4 个热电堆探测器组成, 其主光轴与卫星的 Oz 轴平行, 如图 2 所示. 根据卫星距地球的高度, 可以计算出 4 个探测器的分光轴与主光轴的夹角, 以保证 4 个探测器的视场在地球圆盘的中心, 如图 3 所示. 当卫星姿态有偏差时, 4 个探头的输出将相应发生变化, 得到^[2]

$$\theta_r = \frac{\theta_2 - \theta_4}{2}, \quad \theta_s = \frac{\theta_1 - \theta_3}{2}.$$

其中, θ_r 为卫星滚动姿态角, θ_s 为俯仰姿态角.

静态红外地平仪不需要扫描机构, 没有运动部件, 且体积和质量较小, 功耗较低, 适合长寿命飞行任务, 但其精度较低.

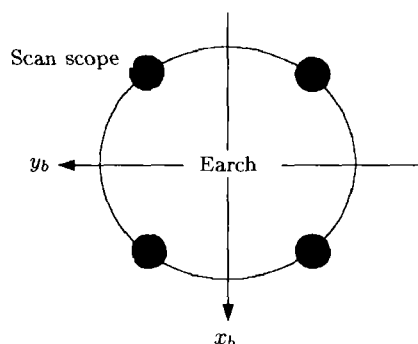


图 2 静态地平仪扫地球示意图

Fig.2 Static infrared earth sensor scans the earth

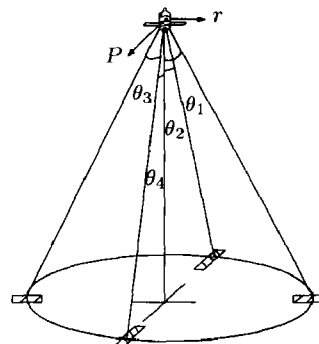


图 3 静态地平仪测姿方法

Fig.3 The way of static infrared earth sensor measuring attitude

2.3 摆动式地平仪

摆动式地平仪由扫描机构、2套红外探头、读角装置和逻辑处理电路4个部分组成。它的视场一般为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ，将地球红外辐射成像在探测元件上，随着光学系统内镜片的摆动，探测器的视场在空间往返直线扫描。它主要有单地平摆动式和双地平摆动扫描式两种类型。由于对地球信号进行交流调制，减少了背景辐射和温度变化对探头的影响，从而降低了敏感器的误差；由于对地球辐射的大范围变化不敏感，特别是视场扫描沿纬度方向，使纬度效应误差大大减少，从而降低了敏感器的系统误差。

当飞行器姿态无误差时，4个探头的扫描中心 A, B, C, D 就是它们的标称穿越点；当飞行器姿态发生俯仰和滚动角偏差时，瞄准轴 z_s 偏离地心，如图4和图5所示，这样地球圆盘中心在 $x_s y_s$ 平面内移到 O' 点，对应姿态的俯仰角 θ 和滚动角 φ 分别为^[3]

$$\theta = \frac{1}{2}[(x_A - x_{A'}) + (x_C - x_{C'})] = \frac{1}{2}[(x_B - x_{B'}) + (x_D - x_{D'})],$$

$$\varphi = \frac{1}{2}[(x_B - x_{B'}) - (x_A - x_{A'})] = \frac{1}{2}[(x_C - x_{C'}) - (x_D - x_{D'})].$$

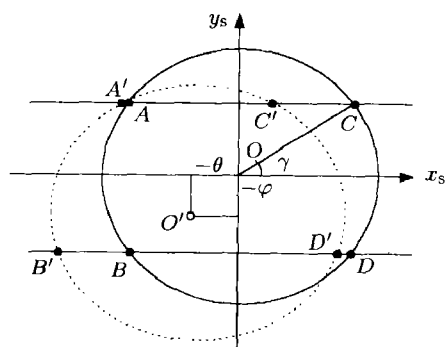


图 4 摆动式地平仪扫描原理

Fig.4 The principle of swing infrared earth sensor

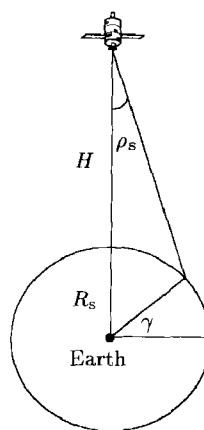


图 5 摆动式地平仪扫描与地球的几何关系

Fig.5 The relationship between the earth and swing infrared earth sensor

摆动红外地平仪精度、可靠性高且寿命长, 主要用于长寿命的地球同步卫星, 如我国的东方红 3 号系列卫星。

3 红外地平仪所受的干扰及对策

卫星在轨道上运行, 红外地平仪在敏感到地球红外辐射的同时, 还会敏感到月亮和太阳的红外辐射。太阳的红外辐射比地球大得多, 当太阳进入红外地平仪视场时, 会产生太阳干扰信号; 并且地平仪还会收到 14—16 μm 波段辐射能量的月球信号, 此信号与地球辐射能量相近, 地平仪也能敏感到, 从而产生干扰。红外地平仪遇到月亮和太阳的机会取决于它们之间的位置、能量、波长和卫星的姿态。

3.1 太阳对圆锥式扫描红外地平仪的干扰

红外地平仪一般安装在近地卫星的前进方向即滚动轴 x 轴方向和俯仰轴 y 方向, 如图 6 所示, 设红外的光轴与 x 轴夹角为 θ 。在地球惯性系中, 设卫星位置为 $\mathbf{r}$, 卫星速度为 $\mathbf{v}$, 太阳位置为 $\mathbf{s}$ 。若以卫星几何原点 O 为起点, 定义卫星 $+x$ 轴方向矢量为 $\mathbf{V}$, 太阳方向矢量为 $\mathbf{S}$, $\mathbf{V}$ 与 $\mathbf{S}$ 的夹角为 α 。其中,

$$\begin{aligned}\mathbf{V} &= \mathbf{r} \times \mathbf{v} \times \mathbf{r}, \\ \mathbf{S} &= \mathbf{s} - \mathbf{r}, \\ \alpha &= \arccos \left(\frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{S}}{|\mathbf{V}| \cdot |\mathbf{S}|} \right).\end{aligned}$$

设红外地平仪光学视场的角度为 β , 在不考虑地球遮挡太阳的情况下, 当 $|\alpha - \theta| < \beta/2$ 时, 红外受到干扰。

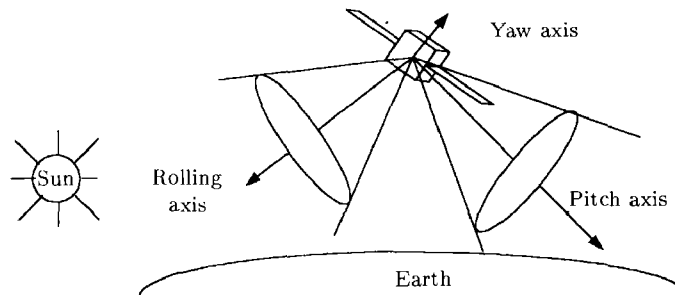


图 6 卫星上红外地平仪工作示意图

Fig.6 A infrared earth sensor in satellite

太阳不被地球遮挡的条件是

$$\arccos \left(\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{S}}{|\mathbf{r}| \cdot |\mathbf{S}|} \right) > \arcsin \left(\frac{R_e}{|\mathbf{r}|} \right),$$

式中 R_e 为地球半径。

图 7 是某近地卫星 x 轴地平仪 2002 年 12 月 25 日连续 3 圈升轨过程中遇到太阳的情况, 检测输出为 8.45 V; 未遇到太阳时, 其值为 0 V。该图说明了滚动地平仪每圈都扫到

了太阳. 图 8 是理论计算结果, 值为 1 时, 表明后滚动地平仪遇太阳. 考虑到遥测数据采样间隔, 可以看出, 我们的计算结果是与实际情况完全一致.

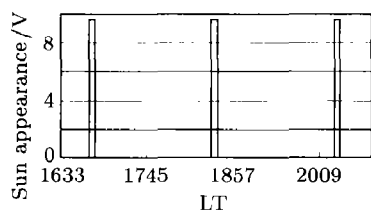


图 7 近地卫星的滚动地平仪遇太阳情况
Fig.7 A rolling infrared earth sensor meets the Sun

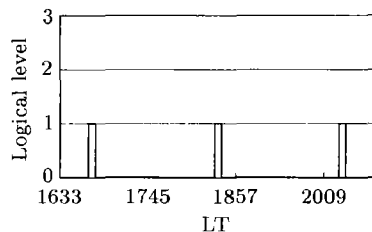


图 8 理论计算某卫星滚动地平仪遇太阳情况
Fig.8 The result of calculation for a infrared earth sensor meeting the Sun

3.2 月亮对红外地平仪的干扰

月亮本身并不发光, 只反射太阳光, 因此其亮度随日、月间距离和地、月间距离的改变而变化. 它的平均亮度为太阳的 $1/465\,000$, 亮度变化幅值从 $1/630\,000$ 到 $1/375\,000$, 即一年内的变化达 43%, 红外地平仪敏感到月亮信号的强度也因此变化. 图 9 给出了一年内月亮到太阳之间的距离变化情况, 其最大值与其最小值之差可达 3.78%. 当月亮到太阳距离最近时, 月亮亮度最大. 图 10 是 2002 年 11 月月圆前后卫星看见的月亮亮度变化情况. 可以认为, 如果发生月亮对红外地平仪的干扰, 最大可能出现在每年的年末和年初的月圆前后.

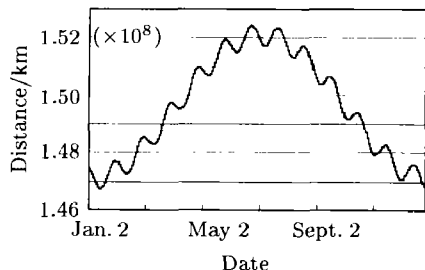


图 9 2002 年太阳到月亮的距离变化情况
Fig.9 Distance variation between the Sun and the Moon

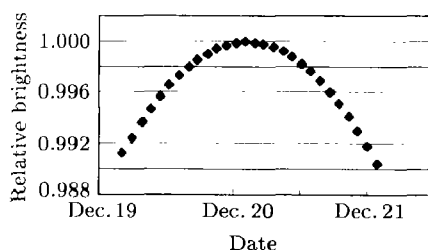


图 10 2002 年 11 月阴历前后月亮亮度变化情况
Fig.10 Brightness variation during the days of full moon in Dec. 2002

月亮对红外地平仪的干扰与太阳相似, 只要将上式中的太阳定义变为月亮即可. 但月亮干扰还需要考虑从卫星上看到月亮时, 月亮被太阳照亮的面积. 只有月亮的光照面积达到一定程度, 才有可能对红外造成影响. 卫星看到月亮的光照面积可采用如下定义, 设月亮横截面积为 1, 以月亮为圆心, 设卫星、月亮、太阳之间的夹角为 θ , 则卫星看到月亮的光照面积可近似为 $(1 + \cos \theta)/2$, 具体计算如下.

在地球惯性系中, 设卫星位置为 r , 月亮位置为 m , 太阳位置为 s . 若以月亮为起点, 定义卫星方向矢量为 R , 太阳方向矢量为 S , R 与 S 的夹角即为 θ . 其中,

$$R = r - m,$$

$$S = s - m,$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{R \cdot S}{|R| \cdot |S|} \right).$$

图 11 是某静止同步卫星 2003 年 2 月 18 日红外受到月亮干扰时弦宽的变化情况. 可以看出, 地平仪受到两次干扰. 图 12 和图 13 是受干扰时太阳、地球和月亮之间的位置关系.

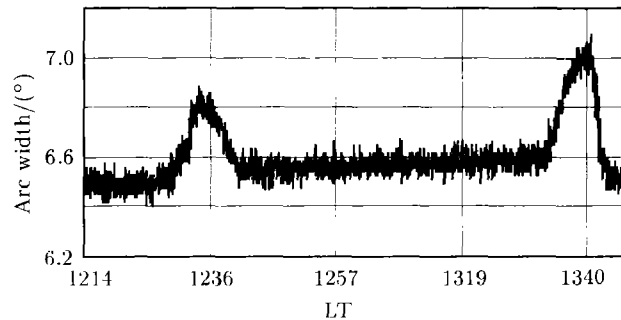


图 11 红外受月亮干扰时弦宽变化情况

Fig.11 Variation of arc width with the interference from the Moon

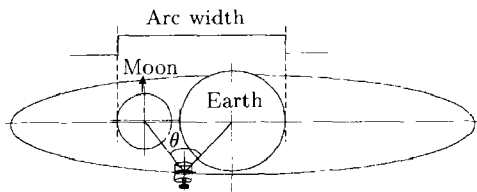


图 12 第 1 次月亮干扰时月亮地球之间的位置
Fig.12 The first time relation between the Moon
and the Earth

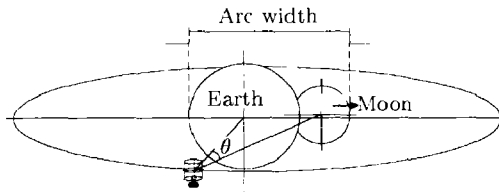


图 13 第 2 次月亮干扰时月亮地球之间的位置
Fig.13 The second time relation between the
Moon and the Earth

3.3 避免干扰对策

1. 星上硬件措施

在圆锥扫描地平仪前加装太阳探头, 相对于主光轴, 设计成太阳保护探头的视场大于地敏视场. 当太阳保护探头遇到太阳时, 给出保护信号, 星上处理电路则自动禁止红外地平仪输出, 以避免其输出假姿态数据. 卫星上一般都安装有两个地平仪, 当一个地平仪被禁止时, 另一个地平仪通过耦合作用可以得到被禁止地平仪姿态信息. 尽管这样做会使控制精度有所下降, 但通过软件改进可以消除由此带来的误差.

太阳的红外辐射强度在 $14\text{--}16\ \mu\text{m}$ 波段为地球的 6—13 倍, 为月亮的反射光的平均辐射强度的 14 倍, 约为最强月亮辐射强度的 10 倍, 因此月光的反射辐射强度处于能够触发红外产生脉冲的临界状态, 很容易造成干扰. 经仔细分析后, 通过设置合适的红外辐射接收门限, 可以使其只能敏感到太阳和地球信号, 滤掉月亮干扰信号.

2. 星上软件保护

当前在轨运行的各类实用卫星上广泛采用计算机技术, 通过地面注入的轨道根数或星上 GPS 接收机, 卫星可以很容易确定各星体位置. 再加上简单的太阳和月亮星历, 可以准确地预报出太阳、月亮对红外的干扰时刻. 只要在软件中加上简单判断, 就可以在遇到干扰前禁止地敏输出, 干扰结束后恢复.

另外, 考虑到卫星在太空中运行时, 各天体的摄动力、大气阻力等在短时间内对卫星不会造成很大的扰动. 再考虑到太阳月亮干扰时间较短, 最简单的避免干扰方法就是在短时间红外输出异常时, 星上处理电路不立即跟随, 等干扰过后再重新接入. 曾经有过试验, 一圈内不对卫星滚动姿态进行控制, 其角度变化不超过 0.5° .

图 14 是一种太阳干扰保护程序工作原理图, 当太阳对地平仪产生干扰时, 它从左至右穿过扫描锥体, 由于地平仪的视场只有 1.5° , 干扰只在阴影附近出现. 因此, 保护程序在太阳运行到锥中间位置时, 不进行地平仪保护.

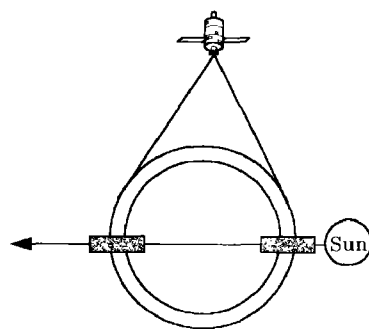


图 14 太阳穿过扫描锥体示意图

Fig.14 The Sun crosses the cone of infrared earth sensor

3. 地面发遥控指令保护

对于地球同步卫星的太阳和月亮干扰保护的最简单的方法是地面发遥控指令进行红外管理. 每年的春、秋分前后, 预报出某个地敏受太阳干扰时刻, 在其被干扰前发令禁止使用, 过后再恢复. 处理月亮对地球同步卫星红外干扰的原则是, 每个月的月圆前后, 当卫星处所看到的月面有相当一部分以上被太阳所照时, 地面发遥控指令将被干扰的敏感器的探测通道关闭.

4 结束语

本文介绍了卫星红外地平仪工作原理, 分析了太阳、月亮对其干扰的原理及精确预报方法, 将这些方法应用于我国的在轨卫星管理中取得了很好的效果, 在给用户提供精确预报的基础上, 避免了一些故障的发生.

参 考 文 献

- [1] Yang Damin. Attitude control system of spacecraft. Harbin: Harbin Industrial Univ. Press, 2000, 34—37. in Chinese (杨大明. 空间飞行器的姿态控制系统. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000, 34—37)
- [2] Chen Fangyun *et al.* Satellite Control Manual. Beijing: Science Press, 1993, 408—410. in Chinese (陈芳允等. 卫星测控手册. 北京: 科学出版社, 1993, 408—410)
- [3] Zhang Renwei. Dynamic and control of orbit and attitude for satellite. Beijing: Beijing Univ. Aeron. Astron. Press, 1998, 202—205. in Chinese (章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998, 202—205)

THE STUDY OF INTERFERENCES FROM CELESTIAL BODIES AND SOLUTIONS FOR THE INFRARED EARTH SENSOR APPLIED IN SATELLITES

LI Yuheng LI Jianyong

(*Xian Satellite Control Center, Xian 710043*)

Abstract

The infrared earth sensor is a very important part of a satellite attitude control system. Its performance and stability directly affect the security of the whole satellite. Some emergencies happened in attitude control system of China on-orbit satellites usually linked to the interference of infrared earth sensor from celestial bodies. This paper discusses what role the infrared earth sensors plays in satellite and how they are interfered. The results of interference sources analysis are presented here. Finally, some ways to precisely predict when the interference happens and how to overcome them are given. They have been successfully used in managing Chinese on-orbit satellite.

Key words Infrared earth sensor, Satellite attitude