

圆锥扫描式红外地平仪原理

董 峰* 刘学明 龚惠兴

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

地球是一个球体, 其扁率很小, 赤道半径和极地半径之比为 297/296, 相当于一个直径三米的球体其横向和纵向尺寸仅有一厘米的偏差。地球的平均亮度温度为 247 K, 地球的冷空间背景的温度极低, 约为 4 K, 因此在外层空间的不同方向看地球, 地球是一个在冷背景上“灼热”的圆盘。圆盘的边缘就是外层空间看到的地平位置所在, 我们称它为地平圆。

根据初等几何学, 已知一个圆, 要找这个圆的圆心, 简单的方法就是在圆周上取三点, 这些点联线的垂直平分线的交点就是圆心。地平仪测量卫星相对于局地垂线姿态偏差的方法与此类同, 它通常在同时或很短的时间内(卫星姿态保持相对稳定)利用地平仪的光学系统和探测器, 遥感三个或三个以上的地平点, 利用地平圆的中心方向, 测量卫星相对于局地垂线的姿态偏差, 误差信号经过处理后送到执行机构, 修正卫星的空间飞行姿态, 使它恢复并保持两轴(俯仰轴、滚动轴)的姿态稳定。

1 姿态敏感的一般原理

人造地球卫星在空间的状态可用六个参数描述, 即三个卫星在空间的位置参数和三个在空间取向的姿态参数。

为研究卫星姿态, 先引入一个直角坐

标系作为参考坐标系, 它由卫星所在位置的地心线 η_1 、轨道平面的垂线 η_2 和第三根轴 η_3 组成。另取一固定在卫星上的坐标系, 它的三根轴是: p -俯仰轴; r -滚动轴; y -偏航轴。坐标原点为 S (如图 1)。卫星的姿态敏感就是测量星上的坐标系相对于参考坐标系的相对转动运动, 偏差角分别为: θ_p -俯仰角; θ_r -滚动角; θ_y -偏航角。

设 O' 是在 S 点看到的地平圆的中心, 联线 SO' 是局地垂线, 其长度用 l 来表示(如图 2)。则地平圆平面的法线方程为:

$$y \cos Y + p \cos P + r \cos R - l = 0 \quad (1)$$

其中 Y 、 P 、 R 是联线 SO' 与 y_{pr} 三根坐标轴之间的交角, 于是:

$$\begin{cases} \frac{\cos P}{\cos Y} = \tan \theta_r \\ \frac{\cos R}{\cos Y} = \tan \theta_p \\ \frac{1}{\cos Y} = \sqrt{1 + \tan^2 \theta_r + \tan^2 \theta_p} \end{cases} \quad (2)$$

将上面关系式代入 (1) 得:

$$y + p \tan \theta_r + r \tan \theta_p - l \sqrt{1 + \tan^2 \theta_r + \tan^2 \theta_p} = 0 \quad (3)$$

其中 θ_p 和 θ_r 是局地垂线 SO' 在 $y-p$ 平面和 $y-r$ 平面上的投影与 y 轴的交角, 即卫星 S 的俯仰和滚动姿态偏差角。

设 h 是卫星 S 上地平仪敏感的一个地

* 98 级博士研究生

平点, 卫星上测量到的地平点俯仰角和方位角分别用 θ 和 ϕ 表示, 于是直线 Sh 的方程为:

$$\frac{y}{\cos\theta} = \frac{r}{\sin\theta\cos\phi} = \frac{p}{\sin\theta\sin\phi} \quad (4)$$

因为地平点 h 在地平圆上, 地平点方程 (3) 是直线方程 (4) 的约束方程, 两式联立求解得:

$$\begin{cases} r = \frac{l(1 + \tan^2\theta_r + \tan^2\theta_p)^{1/2}}{\cot\theta \frac{1}{\cos\phi} + \tan\phi \tan\theta_r + \tan\theta_p} \\ p = \tan\phi \\ y = p \cot \frac{1}{\sin\phi} \end{cases} \quad (5)$$

设地平圆对 S 点的半张角为 ψ , 则有:

$$\frac{l}{\cos\psi} = \frac{r}{\sin\theta\cos\phi} = Sh \quad (6)$$

由方程 (5) 和 (6) 得:

$$\cos\psi = \frac{\cos\theta + \sin\theta\sin\phi\tan\theta_r + \sin\theta\cos\phi\tan\theta_p}{\sqrt{1 + \tan^2\theta_r + \tan^2\theta_p}} \quad (7)$$

又因为: $\sqrt{1 + \tan^2\theta_r + \tan^2\theta_p} = \frac{1}{\cos Y}$
(7) 式可改写为:

$$\begin{aligned} \cos\psi &= \cos Y \cdot \cos\phi + \cos P \cdot \sin\theta\sin\phi \\ &+ \cos R \cdot \sin\theta\cos\phi \end{aligned} \quad (8)$$

这实际上就是直线 SO' 和 Sh 之间的交角方程。

方程 (7) 给出了姿态偏差角 θ_p 、 θ_r 和半张角 ψ 与参数 θ 及 ϕ 之间的函数关系。通常, 卫星上的地平仪敏感地平的方向角 ϕ 是可以预先设定或由星上的方位指示器给出的, 只要测量出三个不同地平点的俯仰角 θ , 就能得到三组参数 $\theta_1\phi_1$ 、 $\theta_2\phi_2$ 、 $\theta_3\phi_3$ 。将它们代入 (7) 式得到三个独立的方程, 计算出姿态偏差角 θ_p 、 θ_r 和对地球的半张角 ψ 。

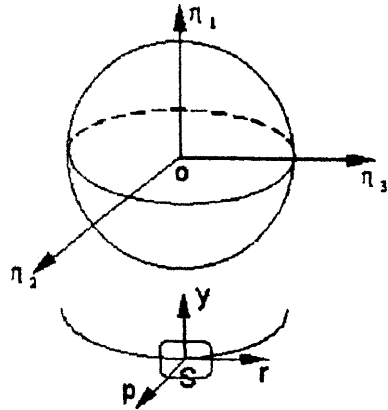


图 1 描述卫星运动的两个坐标系

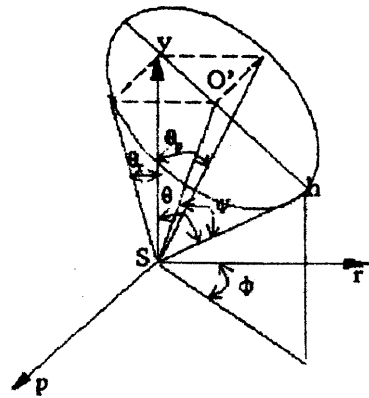


图 2 卫星上的直角坐标系

2 圆锥扫描式地平仪工作原理

圆锥扫描式地平仪的瞬时视场周期对太空和地球进行扫描, 由于宇宙太空的背景温度近似于 4 K, 地球表面的平均温度约 247 K, 当地平仪瞬时视场由太空扫向地球或由地球扫向太空时, 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电信号的跃变。该地平仪就得到了一个方波信号, 方波的中点就是姿态角的零位。地平仪每扫描一周还产生一个基准信号, 这个基准信号在一周期中的相位是固定不变的。当卫星绕轴转动 θ 角时, 地平仪扫描地球所得到的方波信号的前沿和后沿的相位同时改变了

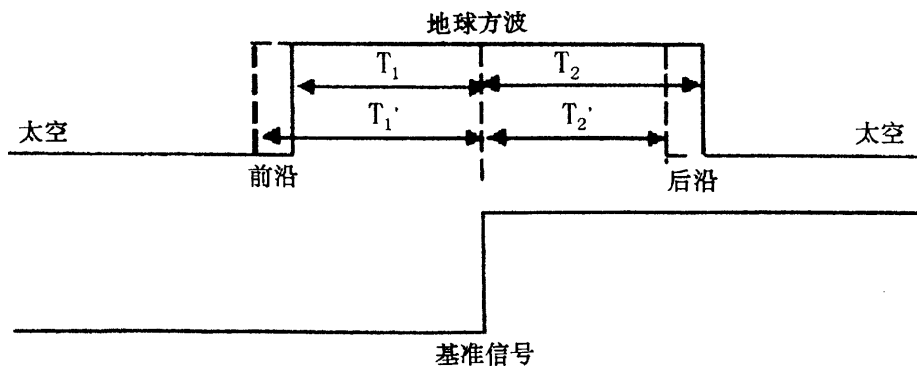


图 3 扫描地平仪工作原理示意图

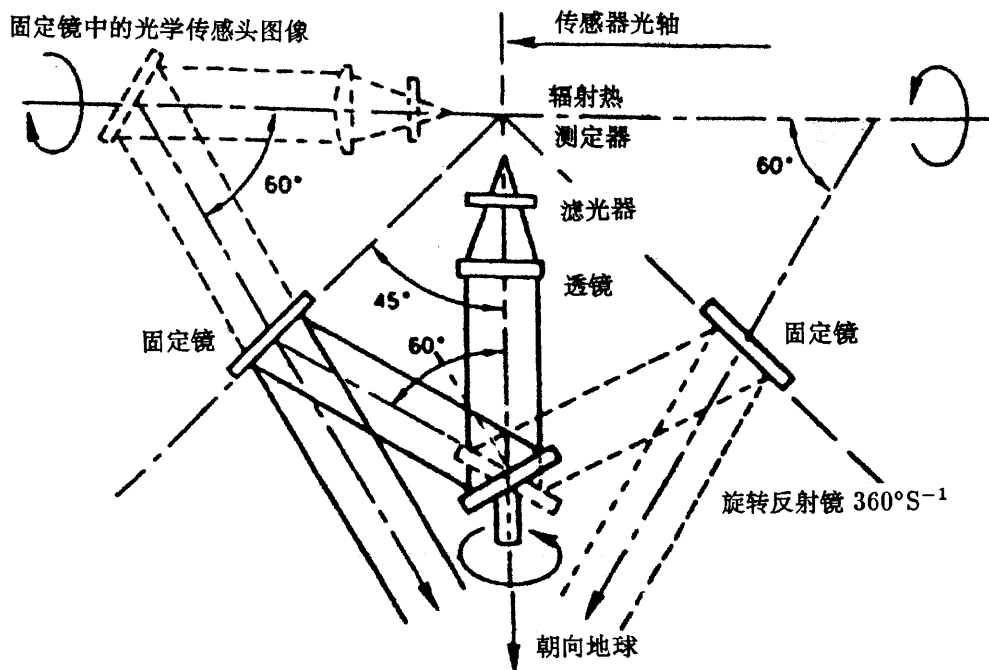


图 4 STD16 光路图

θ 角，也即地球方波的中点偏移了 θ 角，因为基准的相位是不变的，所以测量地球方波的中点相对于基准信号的角位移，就可得到卫星相对于地球的姿态角。

或者，也可以分别测量基准到前沿和后沿的时间 T_1 和 T_2 来确定卫星的姿态角，当 $T_1 = T_2$ 时，定义为零位，卫星转动时， T_1 、 T_2 分别变化 T_1' 、 T_2' ，（ $T_1 \neq T_2$ ，），并且 T_1 、 T_2 与卫星转动的姿态角度成正比，所以，测量 T_1 与 T_2 的差即可求得卫星的姿态角。

如果在卫星的滚动轴方向俯仰轴方

向分别安装一台圆锥扫描地平仪，以测量卫星的滚动角和俯仰角，卫星控制系统可以根据地平仪的测量结果，控制卫星的姿态，保持滚动和俯仰两轴稳定，再依靠偏航姿态角的测量原件来完成偏航姿态角的控制，就可实现卫星的三轴稳定。

从工作原理看出，基准信号、地球方波前沿、后沿（地平点）这三点的位置十分重要。在卫星姿态没有变化的情况下，这三点的方位变化越小，地平仪测得的态度角变化也越小，也即测量的随机噪声越小，地平仪的测量精度越高。

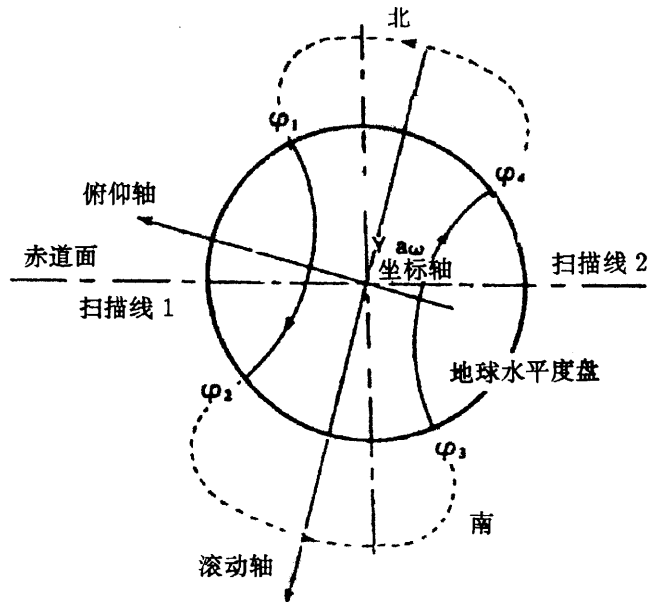


图 5 在地球上的扫描线

3 红外地平仪实例系统 (STD 16)

早期的红外地平仪是作为控制导弹的发动机点火和再入实验用的。于 1959 年 2 月,才首次在卫星上成功测量了卫星绕地球飞行的姿态。由于红外地平仪与其它敏感技术相比具有简单、可靠、且有较高的姿态测量精度(一般在 $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$),所以发展迅速。在以后的载人飞船,特别是对地定向的侦察、气象、通讯、地资等人造卫星上被广泛使用。

国外各大公司纷纷研制红外地平仪系统,如美国高等工艺实验室、巴恩斯公司、通用米尔公司、霍尼韦尔应用物理实验室、国际电报电话联合实验室、科尔斯曼仪表公司、蓝格利研究中心、马丁公司、法国的 SODERN 公司等。SODERN 公司在地球传感器方面成名已有二十年历史。它们制成著名的 STD12 型传感器。1987 年在此基础上开始研制新型红外地球传感器 STD15 和 STD16。

地平仪主要由光学系统、辐射探测器

和电子部件等组成。STD16 型红外地平仪原理结构如图 4 所示。它利用两块固定反射镜和中间的一块旋转反射镜接收地球辐射。固定镜朝向地球,地平圈发射的光信号经过固定镜反射,到达旋转反射镜。旋转反射镜将信号反射,经过透镜、滤光器到热敏电阻,转化为电信号。其主要特性为:

光谱带宽: $(14 - 16.5) \mu\text{m}$

瞬时视场: $2.7^\circ \times 2.7^\circ$

扫描频率: 1 rps(标称模式)

分辨率 (LSB): 0.00550

若工作视域为 700 公里:

标称模式: $R = \pm 5^\circ$ $P = \pm 5^\circ$

(完全精确、线性响应)

扩充域: $R = \pm 34^\circ$, $P = \pm 13^\circ$

其中, R 为滚动角偏差, P 为俯仰角偏差。卫星在 700 公里高空极轨飞行,旋转镜子旋转相当于卫星在扫描地球,划出如图 5 所示的扫描线:图中 ϕ_1 为地平仪测得的敏感地平的方位角,由方程可以计算出俯仰角偏差和滚动角偏差。