

# 在地球同步轨道上工作的扫描辐射计 二维扫描的实施方法与分析

裴云天

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文介绍了在地球同步轨道上工作的扫描辐射计可能取的各种扫描方式。本文分析了各种扫描方式的特点,并比较了它们的优缺点。

## 一、前 言

当卫星处于赤道上空 35800 km 时,也即处于地球同步轨道时,由于卫星绕地球的旋转角速度与地球自旋角速度相等,故卫星相对于地球处静止状态。众所周知,扫描辐射计要完成一幅图象的扫描,必须作二维扫描。在同步轨道上卫星对地球的张角约为  $17.5^\circ$ ,故通常取一帧图象的大小为  $20^\circ \times 20^\circ$ 。

二维扫描的实施方式与卫星姿态有关,即卫星处于三轴稳定状态还是自旋稳定状态。由于地球是球体,作二维扫描时会产生图象畸变。这个问题在采取任何一种扫描方式时都会碰到,本文不作讨论。当采取不同扫描方式时,由于扫描方式本身的缺陷也会使图象产生畸变,这是本文要讨论的问题。同时本文还就各种扫描方式的优缺点略作讨论。

## 二、卫星取三轴稳定姿态

此时卫星相对于地球完全静止。故必须由扫描辐射计本身完成对地球的二维扫描。一般可采取以下方式:

### 1. 摆镜作南北正弦扫描,仪器整体作东西步进

图 1 中摆镜绕  $x$  轴作南北向正弦扫描。扫描一行后,仪器整体绕  $z$  轴作东西向步进。摆镜的摆幅为  $\pm 5^\circ$ ,仪器步进幅度为  $\pm 10^\circ$ 。美国休斯飞机公司桑塔巴巴拉研究中心正在研制的“风暴”卫星(Stormsat)采用了这种扫描方式<sup>[1]</sup>。

若用  $N$  表示摆镜法线,  $P$  表示仪器东西向步进角,  $\theta'$  表示摆镜法线  $N$  与  $z'$  轴夹角,  $n_\alpha$  表示元件出射光线  $I$  与  $z'$  轴夹角,则可用光线追迹公式求得扫描轨迹。

图 2 中  $P = -10^\circ \sim 10^\circ$ ,  $\theta' = 130^\circ \sim 140^\circ$ , 当  $P = 0$ ,  $\theta' = 135^\circ$  时,仪器过星下点。 $y$  轴指向地球。

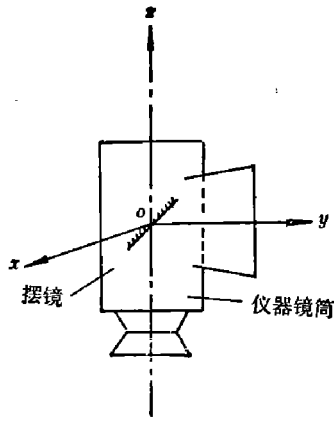


图1 “风暴”卫星采用的扫描方式

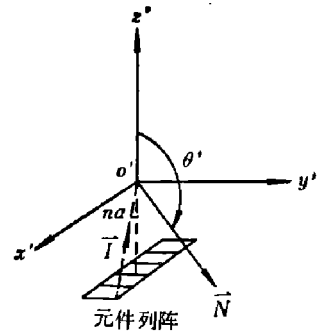
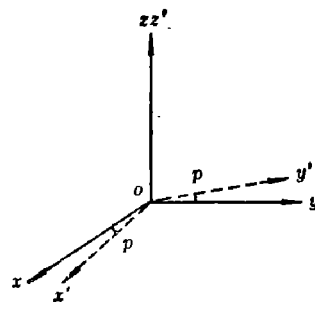
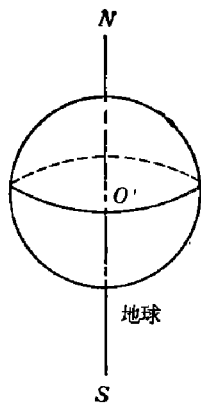


图2 “风暴”卫星的坐标变换示意图

则在  $x'y'z'$  坐标系中有:

$$\begin{cases} N = \sin \theta' j' + \cos \theta' k', \\ I = -\sin na i' + \cos na k'. \end{cases} \quad (1)$$

由坐标旋转变换式

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos P & -\sin P & 0 \\ \sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix}, \quad (2)$$

可求得  $N, I$  在  $xyz$  坐标系中的表示式:

$$\begin{cases} N = -\sin \theta' \sin P i + \sin \theta' \cos P j + \cos \theta' k, \\ I = -\sin na \cos P i - \sin na \sin P j + \cos na k. \end{cases} \quad (3)$$

利用平面镜反射矢量关系式:

$$R = I - 2(N \cdot I)N, \quad (4)$$

可求得反射光线矢量  $R$  ( $r_1, r_2, r_3$ ) 为

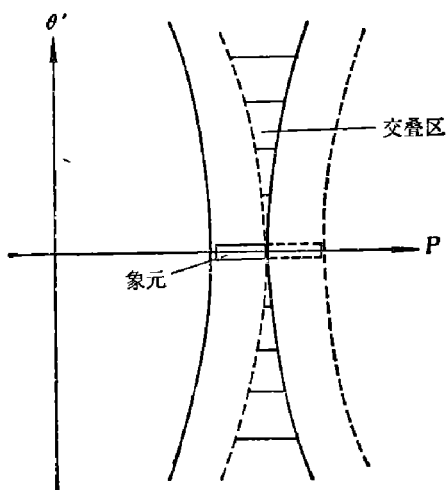


图3 相邻两步的扫描轨迹图

$$\begin{cases} r_1 = -\sin na \cos P + \sin 2\theta' \cos na \sin P, \\ r_2 = -\sin na \sin P - \sin 2\theta' \cos na \cos P, \\ r_3 = -\cos na \cos 2\theta'. \end{cases} \quad (5)$$

当固定步进角  $P$  仅以  $\theta'$  作参变量时(即仅实现摆镜的南北正弦扫描),则式(5)中光线矢量  $R$  将在大地平面上画出双曲线的轨迹。其结果是相邻两步的扫描线互为交叠,且随着摆角  $\theta'$  对中心位置的偏离,其交叠量也增大(如图3所示)。不过当列阵的长度较小时,交叠量很小,一般可忽略。

但当仪器整体步进时,这种扫描方式在地面上的象元只有东西向的平移,没有象元的旋转。这样地面校正工作量就简单一些。

## 2. 用一块摆镜,两个常平架作二维扫描

在这种扫描方式中,外部常平架使内部常平架连同摆镜一起绕  $x$  轴作  $q$  角的南北向步进。而内部常平架使摆镜绕  $z'$  轴作  $\phi'$  角的東西向扫描运动(如图4所示)。

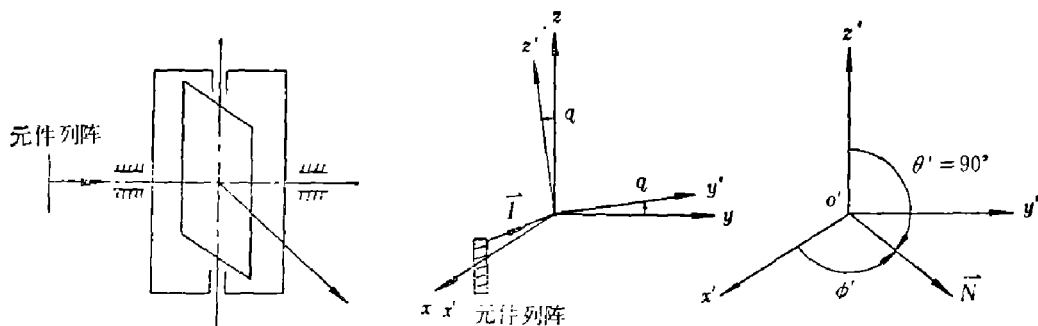


图4 用两个常平架的摆镜及其坐标变换示意图

这里 $q$ (步进角)为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ ,  $\phi'$ (扫描角)为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。当 $q=0$ ,  $\phi'=45^\circ$ 时, 仪器过星下点。这里 $y$ 轴指向地球。则在 $x'y'z'$ 坐标系中有 $N = \cos \phi' \mathbf{i}' + \sin \phi' \mathbf{j}'$ 。

由坐标旋转变换式

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & -\sin q \\ 0 & \sin q & \cos q \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix}, \quad (6)$$

可得 $N$ 在 $xyz$ 坐标系中表示式为

$$N = \cos \phi' \mathbf{i} + \cos q \sin \phi' \mathbf{j} + \sin q \sin \phi' \mathbf{k},$$

而

$$I = -\cos \alpha \mathbf{i} - \sin \alpha \mathbf{k},$$

则代入式(4)可求得反射光线矢量 $R(r_1, r_2, r_3)$ :

$$R: \begin{cases} r_1 = -\cos \alpha - 2 \cos \phi' (N \cdot I), \\ r_2 = -2 \cos q \sin \phi' (N \cdot I), \\ r_3 = -\sin \alpha - 2 \sin q \sin \phi' (N \cdot I). \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$N \cdot I = -\cos \alpha \cos \phi' - \sin \alpha \sin q \sin \phi'. \quad (8)$$

由式(7)和(8)可得出光线矢量 $R$ 在大地平面的扫描轨迹。其扫描轨迹特点如下:

(1) 类似于第一种扫描方式, 其东西扫描线为双曲线。

(2) 当外部常平架作南北向步进运动时, 象元在地球上产生旋转。当摆镜在中心位置, 即 $\phi'=45^\circ$ 时, 象元的旋转角等于步进角 $q$ 。而固定某一步进角 $q$ , 摆镜作东西向扫描时, 象元的旋转角继续增大。但象元继续旋转可能产生的负交叠与扫描轨迹是双曲线可能产生的正交叠差不多正好抵消, 结果扫描线几乎是直线(因为双曲线的曲率很大)。

图5表示了这种扫描轨迹。

扫描线为双曲线及象元的旋转都将影响图象的配准。须在地面上校正。其校正公式即为公式(7)、(8)。显然, 这里校正工作量大。另外仪器步进时产生的象元旋转会使相邻两条扫描线之间产生负交叠。这会影响图象的质量。因此必须适当减小步距角, 使相邻两条扫描线之间不产生负交叠。

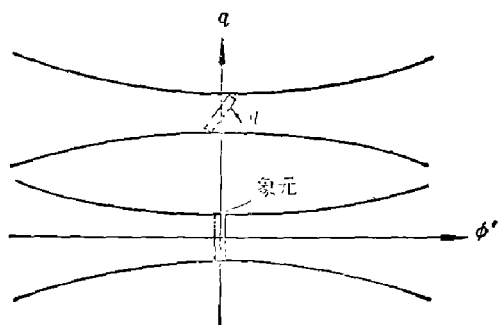


图5 用两个常平架的扫描轨迹图

### 3. 用两块摆镜完成二维扫描

图6中摆镜 $N$ 与 $N'$ 互为独立。其中摆镜 $N$ (法线矢量)在 $yOz$ 平面绕 $x$ 轴作南北方

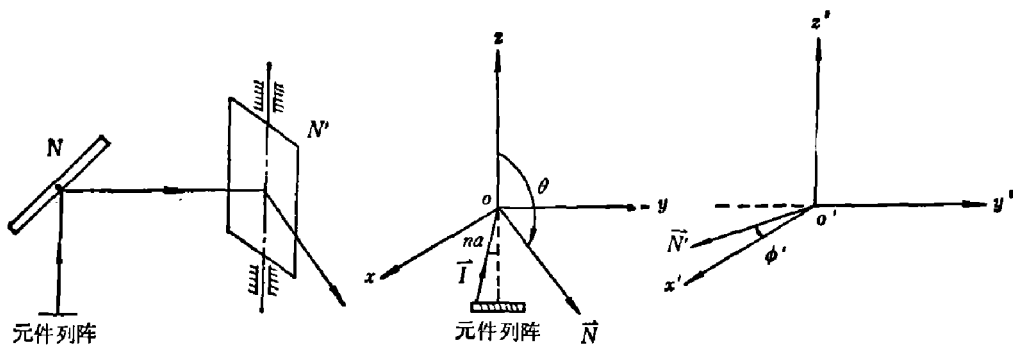


图6 用两块摆镜及其坐标变换的示意图

向步进扫描。摆镜  $N'$  在  $x'O'y'$  平面绕  $z'$  轴作东西向扫描。图中  $\theta$  (步进角) 为  $135^\circ \pm 5^\circ$ ,  $\phi'$  (扫描角) 为  $-45^\circ \pm 5^\circ$ 。

当  $\theta = 135^\circ$ ,  $\phi' = -45^\circ$  时, 仪器过星下点。这里  $x'$  轴指向地球。则在  $xyz$  坐标系中有

$$\begin{cases} N = \sin \theta j + \cos \theta k, \\ I = -\sin \alpha j + \cos \alpha k. \end{cases}$$

利用式(4)可得:

$$R = [-\sin \alpha - 2(N \cdot I) \sin \theta] j + [\cos \alpha - 2(N \cdot I) \cos \theta] k, \quad (9)$$

其中

$$N \cdot I = -\sin \alpha \sin \theta + \cos \alpha \cos \theta. \quad (10)$$

注意到

$$R = I', \quad (11)$$

则在  $x'y'z'$  坐标系中有

$$N' = \cos \phi' i' + \sin \phi' j'. \quad (12)$$

利用公式(4)、(9)、(10)、(11)、(12)可求得出射光线空间矢量  $R'(r'_1, r'_2, r'_3)$ :

$$R': \begin{cases} r'_1 = -2(N' \cdot I') \cos \phi', \\ r'_2 = -\sin \alpha - 2(N \cdot I) \sin \theta - 2(N' \cdot I') \sin \phi', \\ r'_3 = \cos \alpha - 2(N \cdot I) \cos \theta. \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$N' \cdot I' = \sin \phi' [-\sin \alpha + 2 \sin^2 \theta \sin \alpha - \sin 2\theta \cos \alpha]. \quad (14)$$

仍可用公式(10)、(13)、(14)求得空间光线矢量在大地平面的扫描轨迹。

我们发现, 其扫描轨迹是一族双曲线。且随着步距角的增大, 其东西扫描线的曲率愈大。这样, 同一扫描线不在同一纬度上。例如, 当  $\theta = 130^\circ$ , 即扫描线处于北纬  $10^\circ$  时, 当扫描镜  $N'$  从中心位置扫到边缘位置 (即  $\phi'$  从  $-45^\circ$  扫到  $-40^\circ$  时), 象元所处位置在南北向可相差 100 km 左右 (约为  $2.78 \text{ mr}$ ), 如图 7 所示。这是需要作地面校正的。

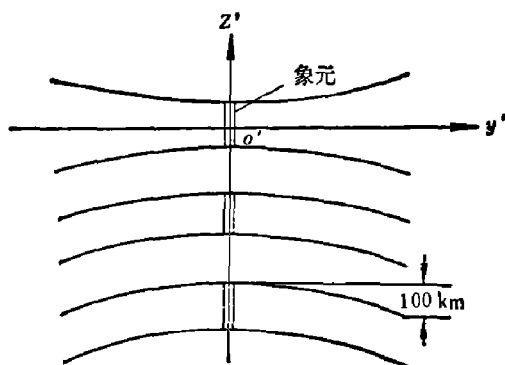


图7 用两块摆镜的扫描轨迹图

但扫描镜  $N$  作南北向步进及  $N'$  作东西向扫描时, 并不发生象元的旋转。这样地面校

正工作可简单一些。问题是这里需要两块扫描镜。一般在同步轨道上工作的扫描辐射计的口径都较大,则需要的两块摆镜也很大。这不仅使机械结构变得庞大且复杂,而且使光学象质也恶化。综上所述,当卫星取三轴稳定的姿态时,相对来说,第一种扫描方式更为合适。它结构相应简单些,地面校正工作量也小一些。

### 三、卫星取自旋稳定姿态

在这种情况下,通常卫星的自旋轴与地球的南北轴线平行。这样可利用卫星的自旋运动完成对地球的东西扫描。则扫描辐射计仅需解决本身的南、北步进运动。这也有两种方式可取:

#### 1. 利用摆镜完成南北步进运动。

图 8 表示了这种扫描方式。以  $P$  角表示卫星绕  $z$  轴自旋角,  $\theta'$  表示摆镜法线  $N$  与  $z'$  轴夹角,  $\alpha$  表示光线  $I$  与  $z'$  轴夹角(如图 9 所示)。

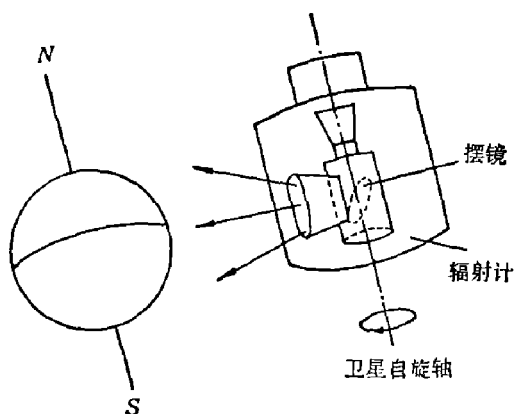


图 8 同步气象卫星采用的扫描方式

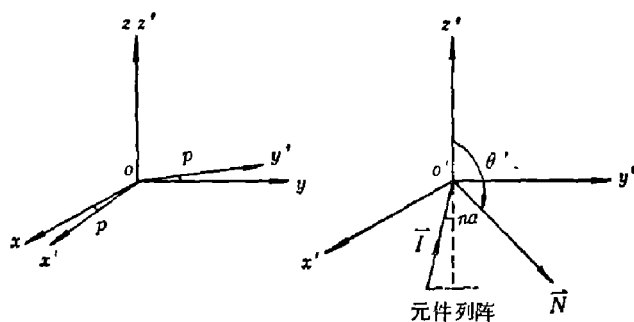


图 9 同步气象卫星扫描时的坐标变换示意图

则  $P = -10^\circ \sim 10^\circ$ ,  $\theta' = 130^\circ \sim 140^\circ$ 。当  $P = 0^\circ$ ,  $\theta' = 135^\circ$  时仪器过星下点。 $y$  轴指向地球。

则在  $x'y'z'$  坐标系中有

$$\begin{cases} I = \sin \alpha j' + \cos \alpha k', \\ N = \sin \theta' j' + \cos \theta' k'. \end{cases}$$

代入式(4)可求得反射光线  $R'(r'_1, r'_2, r'_3)$ :

$$R': \begin{cases} r'_1 = 0, \\ r'_2 = \sin \alpha \cos 2\theta' - \cos \alpha \sin 2\theta', \\ r'_3 = -\cos \alpha \cos 2\theta' - \sin \alpha \sin 2\theta'. \end{cases}$$

再由式(2)坐标变换到  $xyz$  坐标系中可求得  $R(r_1, r_2, r_3)$ :

$$R: \begin{cases} r_1 = \sin P \cos \alpha \sin 2\theta' - \sin P \sin \alpha \cos 2\theta', \\ r_2 = \sin \alpha \cos 2\theta' \cos P - \cos \alpha \sin 2\theta' \cos P, \\ r_3 = -\cos \alpha \cos 2\theta' - \sin \alpha \sin 2\theta'. \end{cases} \quad (15)$$

我们发现其扫描轨迹与上述用两块摆镜的扫描轨迹一样(参见图 7)。即扫描、步进时

没有象元的旋转。但东西扫描时,扫描线不在同一纬度上,最严重时也可相差 100 km,这是需要地面校正的。另外也应合理选择步距角,否则相邻扫描线可能有负交叠出现。美国休斯公司桑塔巴巴拉研究中心已发射的同步气象

卫星(SMS)采用了这种扫描方式。<sup>[2]</sup>

## 2. 辐射计镜筒整体作南北步进运动

图 10 表示了这种扫描方式。这里省去了平面摆镜,而利用整个镜筒带动主镜、次镜、第一折叠镜一起绕步进轴  $y$  轴作南北步进运动。由于第一折叠镜的折出光线与步进轴  $y$  轴重合,故步进时探测器位置是不动的。

若以  $z$  轴表示地球南北极方向即卫星自旋轴方向,  $x$  轴表示指向地球方向,  $y$  轴为地球东西方向,并以  $P$  角表示卫星自旋扫描角,以  $\theta$

图 10 欧洲气象卫星采用的扫描方式

角表示仪器步进角,以  $n\alpha$  表示光线  $I$  的方向角,则有  $P = -10^\circ \sim 10^\circ$ ,  $\theta = -10^\circ \sim 10^\circ$ 。

当  $P=0$ ,  $\theta=0$  时仪器过星下点位置。如上述推导一样,可求得出射光线矢量  $R(r_1, r_2, r_3)$ :

$$R: \begin{cases} r_1 = \cos P \left( \cos \theta \cos n\alpha + \frac{1}{2} \sin n\alpha \sin 2\theta \right) - \sin P \sin n\alpha \sin \theta, \\ r_2 = \sin P \left( \cos \theta \cos n\alpha + \frac{1}{2} \sin n\alpha \sin 2\theta \right) + \cos P \sin n\alpha \sin \theta, \\ r_3 = \sin n\alpha \cos^2 \theta - \sin \theta \cos n\alpha. \end{cases} \quad (16)$$

它的扫描轨迹综合了上述第二、第三种扫描方式的缺点。即仪器南北步进  $\theta$  角时,象元旋转  $\theta$  角。当仪器作东西扫描时,一方面象元继续旋转,另一方面扫描线为双曲线形状,且不在同一纬度上。与 SMS 自旋扫描一样,最严重时,其纬度可相差  $2.78 \text{ m}^\circ$ (在地面上投影约为 100 km)。图 11 画出了它的扫描轨迹。

尽管这种扫描方式的地面校正工作是复杂的,但由于它没有摆镜,故结构简单,重量轻。欧洲空间中心发射的气象卫星 (Meteosat) 仍采用了这种扫描方式<sup>[3]</sup>。

综上所述,当卫星取自旋稳定姿态时,两种扫描方式各有利弊。一般可根据具体情况选择其中一种。

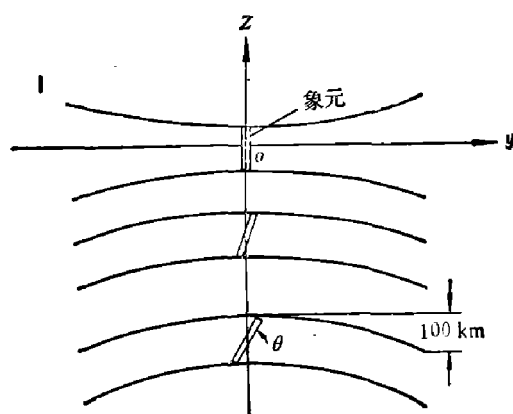


图 11 欧洲气象卫星的扫描轨迹图

## 参 考 文 献

- [1] N77-22451.
- [2] N76-71542.
- [3] Perald I. A. L., *Infrared detection Techniques for Space Research*, Dordrecht, Holland, D. Reidel publishing company, 1971, 93~99

# APPROACH AND ITS ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL SCAN IN THE SCAN RADIOMETER OPERATING ON SYNCHRONOUS EARTH ORBIT

PEI YUNTIAN

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)*

## ABSTRACT

Several scan methods used in the scan radiometer operating on the synchronous earth orbit are described. Their scan characteristics are analyzed with merits and demerits compared.