

# ETM 数据的几何校正

王新民 邵贝恩

(中国科学院遥感卫星地面站北京 100086)

## 摘 要

该文对即将发射的 Landsat-6 ETM 仪器数据的几何校正方法进行论述。文中采用基准矩阵运算、高频矩阵补偿与三次样条函数重采样算法大大简化处理运算。模拟试验结果证明图象内部几何精度可达一个象元之内。

**关键词:** ETM, 几何校正, 基准矩阵, 高频矩阵, 三次样条重采样。

## 1 前言

遥感卫星图象数据的几何校正是图象预处理系统中的关键问题。由于各种干扰因素复杂多变,加以需要处理校正的数据量非常庞大,在生产运行条件下,大量提供高质量数据产品一直是研究发展部门面临的艰巨的任务。现在美国即将发射新的 6 号陆地卫星,我站正对其装载的新一代的增强型主题绘图仪 (ETM) 的数据预处理系统进行研究开发,以满足遥感用户的需要。本文谨就 ETM 的系统几何校正方法进行论述。

## 2 基本几何关系

几何校正的目的是要把遥感数据准确地与地球表面的位置对应起来,并以选定的地图投影方式给出这些数据的图象。卫星观察地球的几何关系如图 1 所示,并可以下式表示:

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + d\mathbf{u} \quad (1)$$

此处,  $\mathbf{R}$  是卫星位置向量,  $\mathbf{u}$  是卫星仪器观察方向的单位向量,  $\mathbf{r}$  是地球观察点位置向量,  $d$  是观察斜距。给定任何一时刻的  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{u}$  和地球椭球模型,就不难求得  $\mathbf{r}$  和  $d$ 。

假设地球模型如下式

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1. \quad (2)$$

此处,  $a$  是地球赤道半径,  $b$  是极向半径。在纬度为  $\phi$  的地球观察点处,其地心距  $r$  为

$$r = \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \phi}{b^2} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

现采用图 2 所示的地心参考坐标系,  $Z$  轴指向北极,  $X$  轴指向当前卫星轨道昇交点,  $Y$  轴

处在  $Z \times X$  方向。卫星飞行轨道坐标系的  $z$  轴指向地心,  $y$  轴沿轨道向量相反方向,  $x$  轴则指向  $y \times z$  方向。6 号陆地卫星轨道为圆轨道, 其半径为  $R$ ,  $i$  是轨道平面离赤道平面的倾角,  $\gamma$  是卫星离轨道升交点的行程角。那

末(1)式可改写为

$$r \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \lambda \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \cos i \\ \sin \gamma \sin i \end{bmatrix} + dT_{IF}T_{FB} \begin{bmatrix} \sin \sigma \\ -\cos \sigma \sin \theta \\ \cos \sigma \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

此处新出现的  $\lambda$  是观察点离轨道升交点的经差,  $\theta$  是卫星仪器沿扫描方向的视角,  $\sigma$  是仪器视角在垂直扫描方向的偏离, 而  $T_{FB}$  和  $T_{IF}$  分别是卫星仪器坐标系列飞行轨道坐标系和飞行轨道坐标系到地心参考坐标系之间的转换矩阵。对于小姿态偏差  $\theta_p$ 、 $\theta_r$  和  $\theta_y$ ,

$$T_{FB} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_y & \theta_p \\ \theta_y & 1 & -\theta_r \\ -\theta_p & \theta_r & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

而

$$T_{IF} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma & 0 & -\cos \gamma \\ \cos \gamma \cos i & \sin i & -\sin \gamma \cos i \\ \cos \gamma \sin i & -\cos i & -\sin \gamma \sin i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

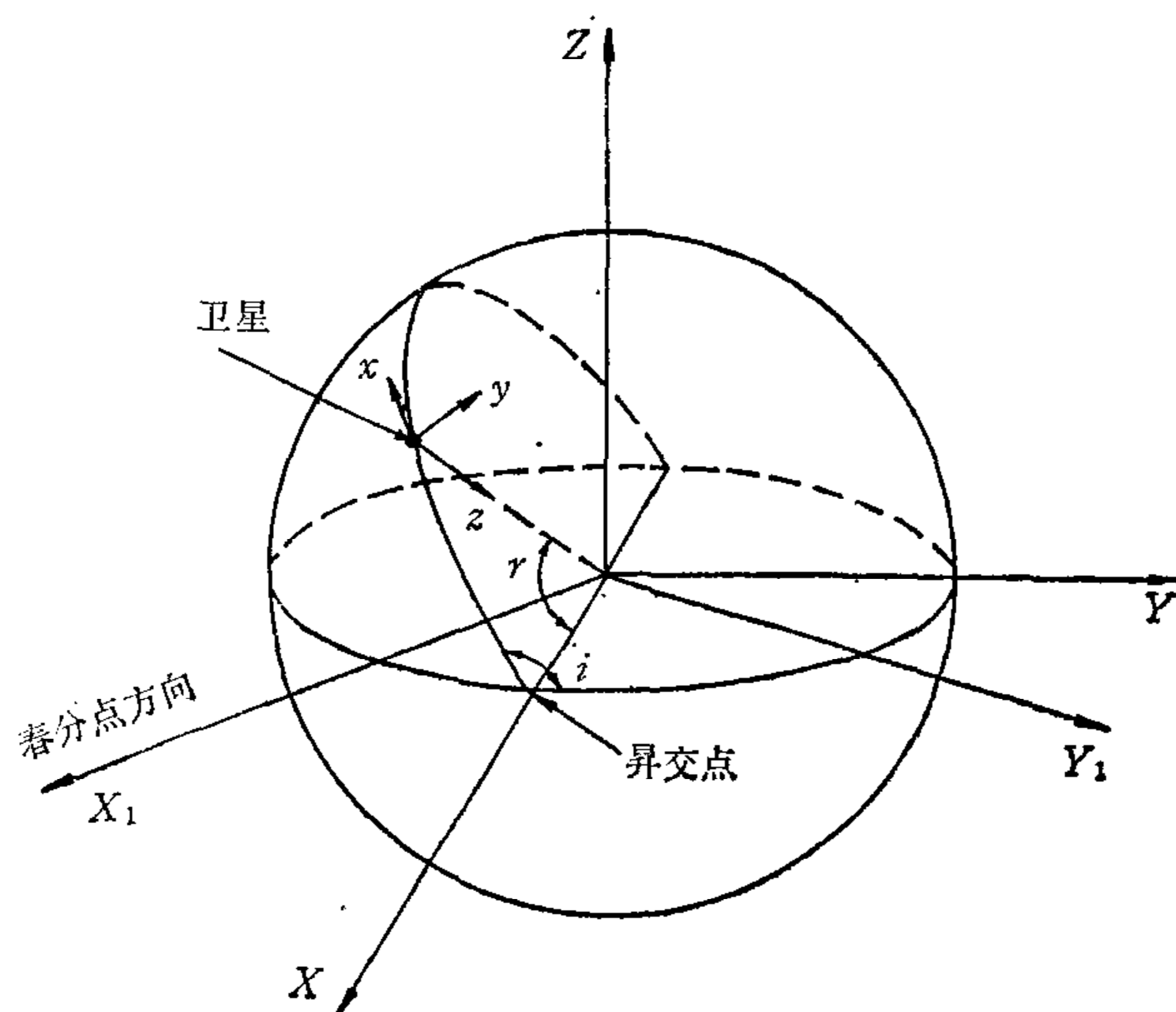


图2 坐标系与飞行轨道

不同的地球投影有其各自的投影关系式, 它们用下列表达式表示:

$$x = f_1(\phi, \lambda + \lambda_{a.n.}) \quad (7)$$

和

$$y = f_2(\phi, \lambda + \lambda_{a.n.}), \quad (8)$$

其中  $\lambda_{a.n.}$  是昇交点方向的地球经度。

显然,在任一时刻的卫星星历位置、姿态偏差和仪器扫描指向已知时,从(5)–(8)式即可求得地球观察点的  $(\phi, \lambda)$  和输出校正图象的  $(x, y)$  值。由于星历、姿态、仪器指向和仪器扫描行  $l$  和象元号  $p$  都是在卫星遥测数据中同步给出的,这样就可得到输入数据坐标  $(p, l)$  与输出坐标  $(x, y)$  之间的对应关系。

但是,几何校正需要得到输出网格点  $(x, y)$  上的灰度值,即需从输出坐标  $(x, y)$  找出其输入  $(p, l)$  平面上的位置,然后再进行重采样确定在  $(x, y)$  点上的灰度值。这逆运算就比较复杂,特别是星历位置、姿态变化、仪器视角指向都是时刻变量的复杂函数。另外,每景图象象元数非常多。ETM 的 8 个波段约有 420 兆个象元点。因此,从生产运行角度来考虑,必须对此运算进行简化。

### 3 基准校正矩阵

为简化运算,先考虑  $\sigma, \theta, \theta_r, \theta_p$  和  $\theta_y$  取其理想值:即姿态没偏差,  $\theta_r = \theta_p = \theta_y = 0$ ;扫描是线性的且没有侧向偏角,  $\theta = \dot{\theta}_{eff}t$  和  $\sigma = \theta$ 。  $\dot{\theta}_{eff}$  是考虑地球自旋后的有效扫描速度。

$$\dot{\theta}_{eff} = \text{sgn} \times \dot{\theta}_M + \dot{\theta}_g \quad (9)$$

这里  $\dot{\theta}_M$  是仪器扫描速率,sgn 用于区分正扫(从西向东)还是反扫(从东向西)。正扫时它取值+1,反扫时取-1。  $\dot{\theta}_g$  是地球自旋产生的影响。

$$\dot{\theta}_g = \frac{\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_E \cdot \mathbf{e}_\omega}{R} \quad (10)$$

和

$$\mathbf{e}_\omega = \frac{\mathbf{R} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{R} \times \mathbf{v}|} \quad (11)$$

这里,  $\boldsymbol{\Omega}$  是地球自旋速度,  $\mathbf{R}_E$  是卫星星下点的位置向量,  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{v}$  是卫星位置和速率向量,  $R$  是卫星飞行高度。显然,  $\mathbf{e}_\omega$  是沿飞行轨道  $y$  轴反向的单位向量,(10)式分子是卫星星下点沿  $y$  轴反向的地球运动速率分量(这里也不考虑姿态偏差)。在此假设条件下,  $T_{FB} = I$ ,而(4)式变为

$$r \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \lambda \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \cos i \\ \sin \gamma \sin i \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} -\sin \gamma & 0 & -\cos \gamma \\ \cos \gamma \cos i & \sin i & -\sin \gamma \cos i \\ \cos \gamma \sin i & -\cos i & -\sin \gamma \sin i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \dot{\theta}_{eff}t \\ \cos \dot{\theta}_{eff}t \end{bmatrix}. \quad (12)$$

上述简化忽略的高频影响将在后面予以补偿。

ETM 8 个波段, 每景图象约有 420M 个象元。直接逐点寻找输出与输入象元点相应关系显然是有困难的。但由于各波段各敏感器在仪器焦平面上的几何位置是固定不变的。因此, 只需对焦平面上光学中心点  $P$  及在垂直扫描方向距  $P$  点  $\sigma_1$  微弧度的  $Q$  点找出输出输入对应关系点, 各波段各象元点的输出输入关系即可经内插等简单运算求得。另外, 由于(12)等式中各参数变化缓慢, 在各次扫描  $i$  上只需在少数点上对  $P$  与  $Q$  求得输出输入对应关系点,  $i$  扫描上的其余点的输出输入对应点也可由内插求得。

图 3 是  $P$  点在  $i$  次扫描时扫过输出平面  $(x, y)$  的情况。它扫过输出网格坐标  $x = x_0$  时的象元号  $p_0$  和坐标值  $y_0$  可由(12)等式求得。同样,  $Q$  点在  $i$  次扫描过  $x = x_0$  的  $(p_1, y_1)$  值也可由(12)等式求得。在实际工作中, 对每景 ETM 的 374 次扫描中, 我们只取正反扫描各 4 次 ( $i_{\text{正扫}} = 1, 125, 249$  和  $373$ ,  $i_{\text{反扫}} = 2, 126, 250$  和  $374$ ); 对每次扫描涉及的约 7 000 多个输出坐标值  $x$  我们只取 8 个值 ( $x = -102.144$

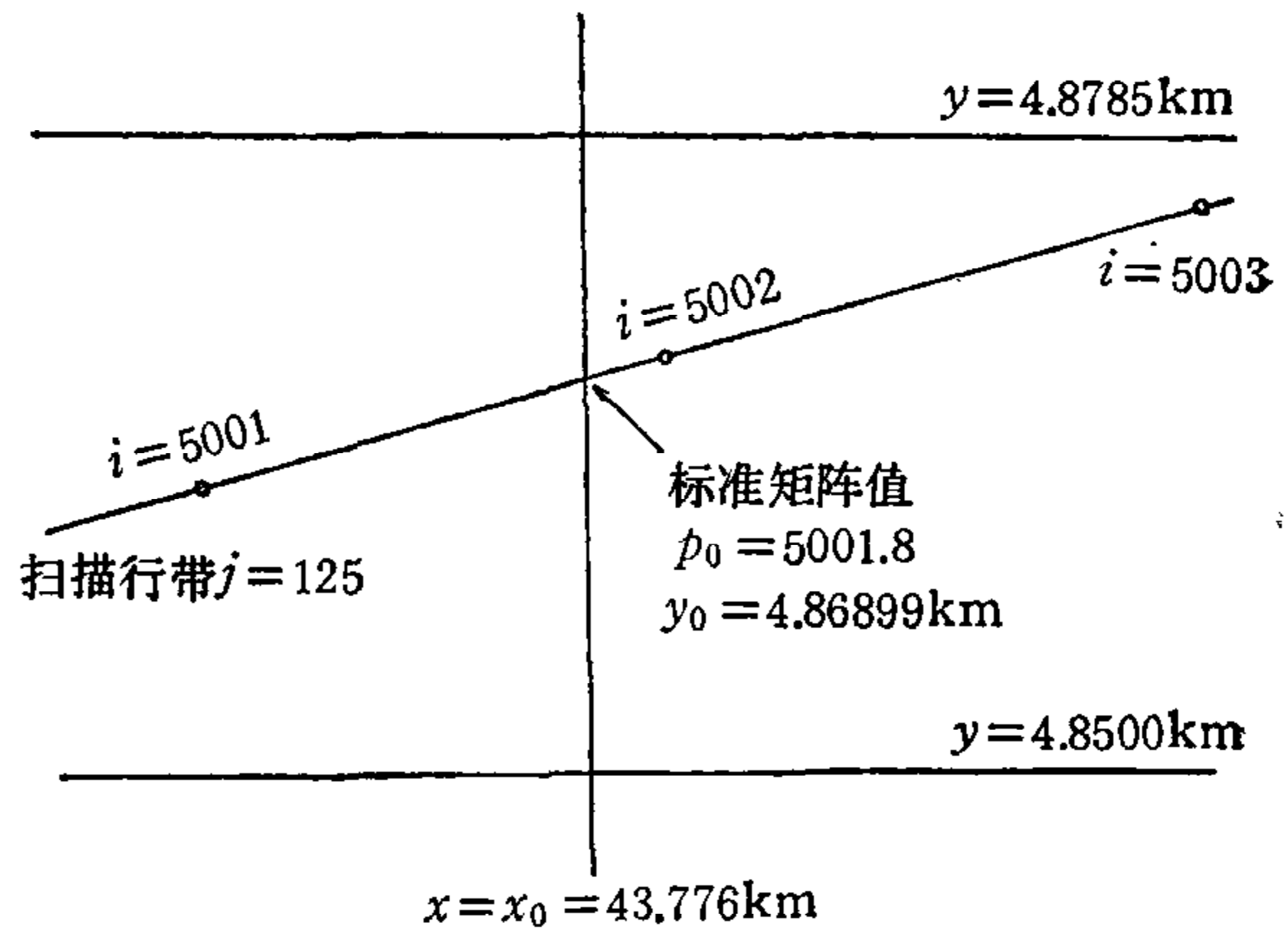


图 3 基准矩阵概念示意图

km,  $-72.96$ km,  $-43.776$ km,  $-14.592$ km,  $14.592$ km,  $43.776$ km,  $72.96$ km 和  $102.144$ km)。求得的正反扫描各  $4 \times 8$  点的  $(p_0, y_0, p_1, y_1)$  值即所谓基准校正矩阵。在具体校正图象需要时, 它可内插加密到各  $(j, x)$  值。这里的  $(p, y)$  也就是文献[1]中的中间混合坐标。它可使原先需用的二维重采样简化为一维重采样。基准矩阵的引用大大减少对(12)等式进行运算的次数并简化加速了重采样运算。

## 4 高频补偿矩阵

高频干扰包括卫星姿态变化和仪器扫描非线性及其侧向(垂直于扫描方向)的偏离。

扫描方向的高频干扰引起仪器象元视角偏离是由滚动偏离  $\theta_r$  和扫描非线性  $\theta_E$  组成(见图 4)

$$\theta_{HF} = \theta_r + \theta_E \quad (13)$$

而侧向视角偏离则由俯仰角、偏航角  $\theta_y$  以及仪器侧向扫描视角偏离  $\sigma_E$  所造成

$$\sigma_{HF} = \sigma_E - \theta_p \cos \theta - \theta_y \sin \theta \quad (14)$$

其中  $\theta$  是扫描角。  $\theta_p$ 、  $\theta_r$ 、  $\theta_y$ 、  $\theta_E$  和  $\sigma_E$  都是从卫星遥测数据处理加工所得。遥测高频信息每 2 毫秒提供一次, 每次扫描约有 35 个采样值。每次扫描的  $(\theta_{HF}, \sigma_{HF})$  值组成高频矩阵。采样频率很高, 扫描行 7 000 多象元的  $(\theta_{HF}, \sigma_{HF})$  值都可由此内插得到。

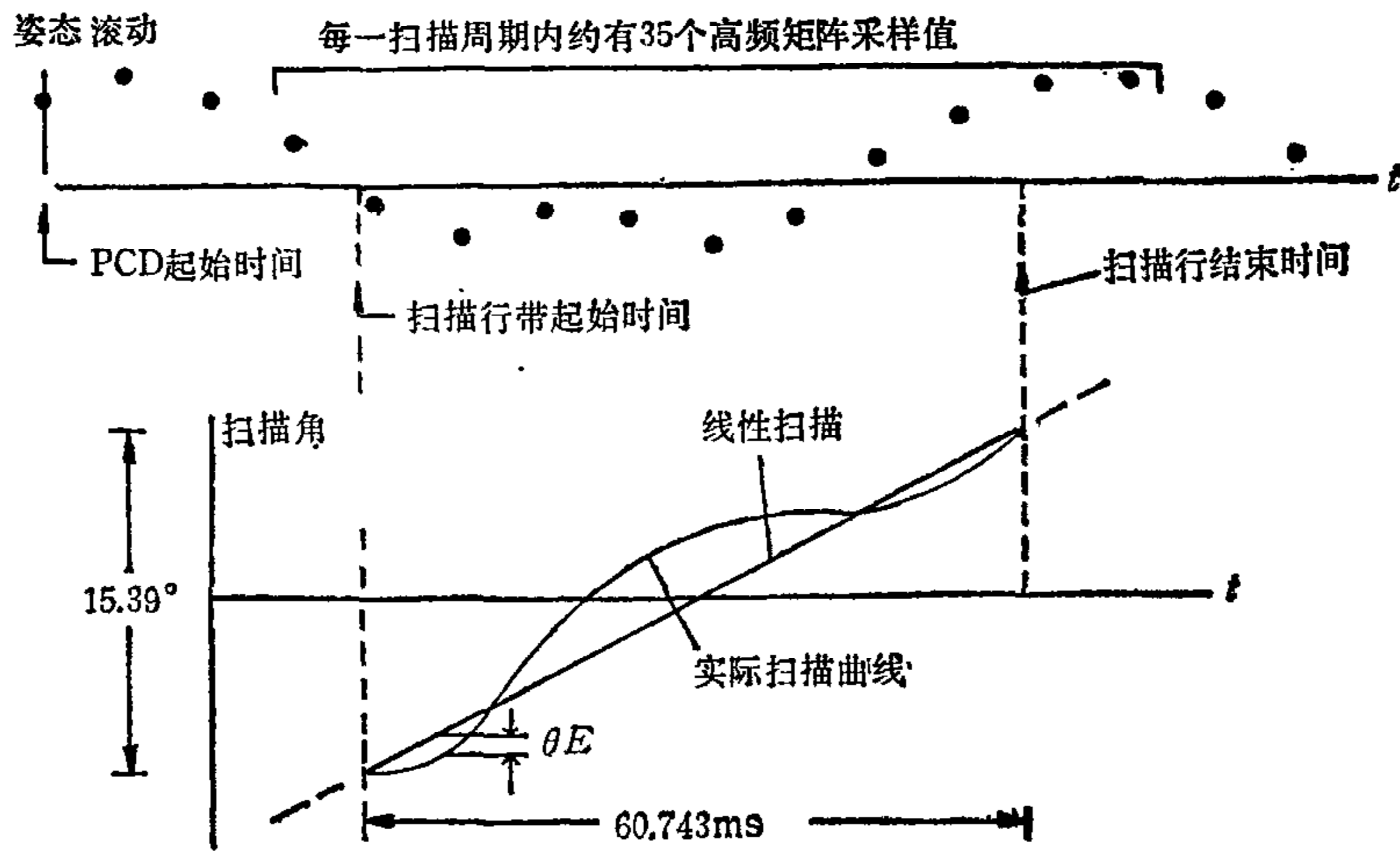


图4 高频矩阵沿扫描方向分量  $\theta_{HF}$

### 5 几何校正的实现

现在计算各波段各传感器在各次扫描扫过输出  $x$  坐标网格的  $(p, y)$  值。由于传感器在光学焦平面上的位置有别于  $P$  点,因而需对  $(p_0, y_0)$  进行调整;也需考虑高频补偿。

基准矩阵中的  $p_0$  是  $P$  点扫过  $x_0$  坐标值的象元点,它距扫描行起始时间  $t_0 = T_p p_0$  (仪器采样周期  $T_p = 9.611\mu s$ )。传感器扫过  $x_0$  值时与  $t_0$  的差异值应是下列三者之和:

$$\Delta t_1 = -\Delta\theta(m)/\dot{\theta}_{eff} \tag{15a}$$

$$\Delta t_2 = -\delta\theta(m, n)/\dot{\theta}_{eff} \tag{15b}$$

和 
$$\Delta t_3 = -U\delta\sigma(m, n)T_p, U = -(p_1 - p_0)/\sigma_1 \tag{15c}$$

这里  $\Delta\theta(m)$  是  $m$  波段中线离光学中心在扫描方向上的偏离角,  $\delta\theta(m, n)$  是  $m$  波段  $n$  传感器在扫描方向离其波段中线的偏角,  $\delta\sigma(m, n)$  则是其在垂直于扫描方向距  $P$  点的偏角。  $\Delta t_3$  是据  $P$  和  $Q$  位置差异产生的影响成比例地推算求得。

高频干扰影响可由下列各式求得:

$$\Delta t_4 = -\theta_{HF}(t_1)/\dot{\theta}_{eff}, t_1 = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_4, \tag{16a}$$

$$\Delta t_5 = -U\sigma_{HF}(t_1)T_p, U = -(p_1 - p_0)/\sigma_0. \tag{16b}$$

综上所述,在  $m$  波段  $n$  传感器扫过  $x_0$  值时,象元号应是

$$p = p_0 + \frac{1}{T_p} \sum_{i=1}^5 \Delta t_i. \tag{17}$$

第一次一维重采样是沿扫描行对中间混合象元点  $(p, y)$  进行的。

对  $y_0$  的调整补偿包括高频部分  $\Delta y_1$  和传感器扫描侧向视角偏离部分  $\Delta y_2$ :

$$\Delta y_1 = S\sigma_{HF}(t_1), \quad t_1 = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_4, \tag{18a}$$

$$\Delta y_2 = S\delta\sigma, \quad S = (y_1 - y_0)/\sigma_1. \tag{18b}$$

最后  $y$  值应是

$$y = y_0 + \Delta y_1 + \Delta y_2. \tag{19}$$

第二次一维重采样是沿  $x = x_0$  的  $y$  坐标方向(垂直方向)对  $(x, y)$  点进行的。

ETM (和 TM) 与通常扫描仪不同, 正扫与反扫都采集数据。在正扫与交扫交替之间存在着变化的、不等于扫描带内各行行距的扫描带间隙。这使一些处理系统不得不先采用三次样条算法在间隙内补充足够的延伸线, 然后再进行通常的三次卷积重采样<sup>[2,3]</sup>。垂直方向的重采样实际上是有两次重采样运算。我们只采用一次在垂直方向的重采样, 即全程采用三次样条函数的重采样算法<sup>[4]</sup>。在等间距时, 这三次样条函数自动变为  $\alpha = -0.5$  的最佳三次卷积函数<sup>[5]</sup>。

经上述处理就可完成 ETM 的系统几何校正。对 ETM 模拟数据进行处理, 产品内部几何畸变小于 1 个象元。至于大地几何绝对精度, 需用地面控制点信息才能提高。这将另文叙述。

**致谢** 在编写本文中曾得到站内刘文忠、刘加、陈京、马亚全等同志的帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] 王新民. 陆地卫星图象数据几何校正方法的探讨. 计算机学报, 1983, 6(4): 314—316.
- [2] Beyer E P. Thematic Mapper Geometric Correction Processing. *Proc. 17th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor, Michigan, May 9-13, 1983.
- [3] Lyon JC and Fischel D., Thematic Mapper Image Production in the Engineering Checkout Phase, *Proc. 2nd Intern. Symp. on Remote Sensing*, Remote Sensing Society of Japan, Tokyo, Nov. 11, 1983.
- [4] 王新民. 陆地卫星主题测绘仪数据的重采样. 中国空间科学技术, 1986, (1): 57—62.
- [5] R G Keys. Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing. *IEEE Trans.* 1981, **ASSP-29** (6): 1153—1166.

## GEOMETRIC CORRECTION OF ETM DATA

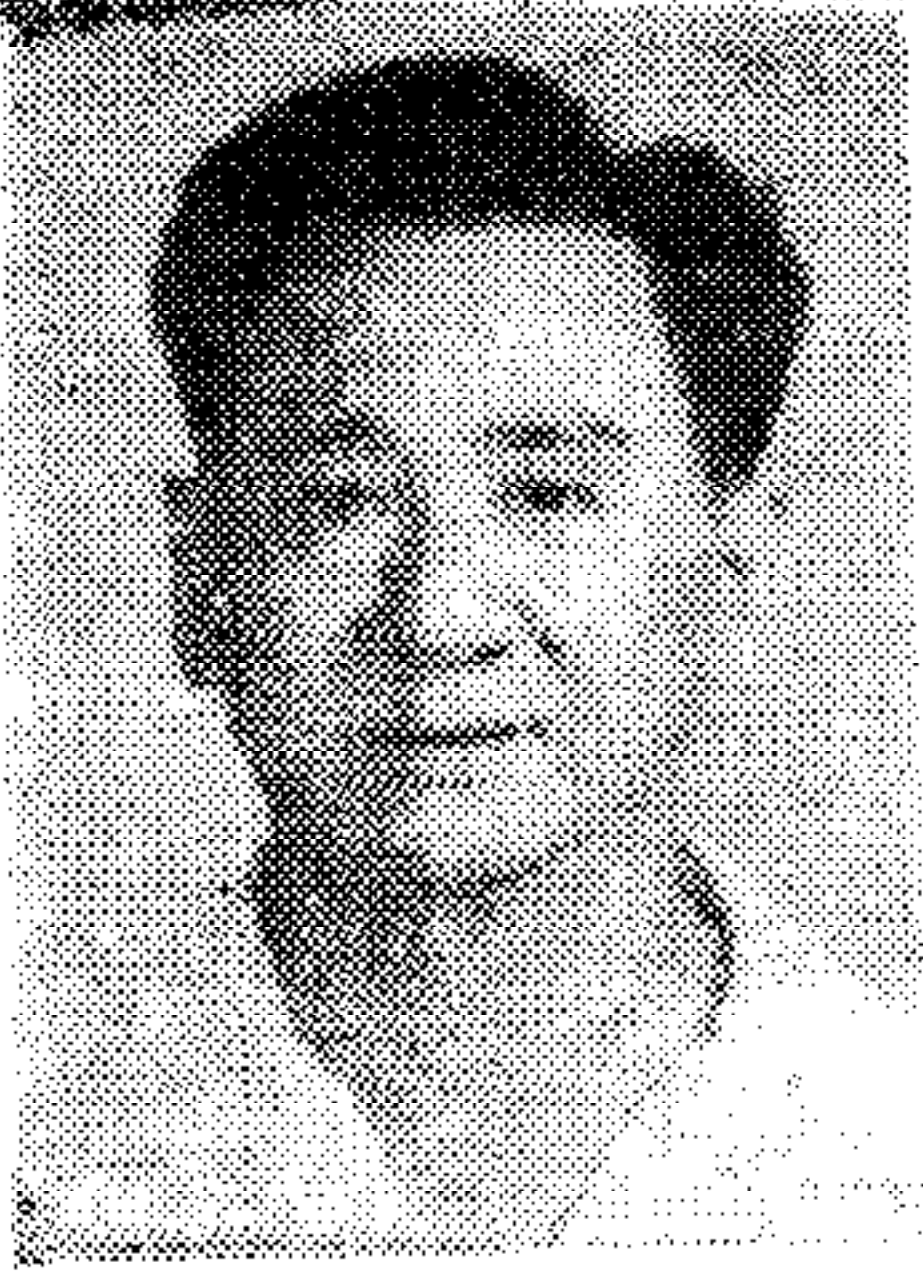
WANG XINMIN SHAO BEIEN

(Remote Sensing Satellite Ground Station Academic Sinica, Beijing 100086)

### ABSTRACT

In this paper the method of geometric correction of ETM data from Landsat-6, to be launched in near future, is discussed. By using benchmark matrix calculation, high frequency matrix compensation and cubic spline resampling the correction processing is greatly simplified. The simulation results show that the internal geometric accuracy of one pixel can be obtained.

**Key words:** ETM; geometric correction; benchmark matrix; high frequency matrix; cubic spline resampling



**王新民** 中科院遥感卫星地面站研究员。1948年毕业于上海交通大学,1960年在苏联科学院自动控制所获副博士学位。早期从事自动控制研究并负责研制我国最早几颗成功发射的卫星姿控系统。70年代中从事图象处理及遥感卫星数据处理,是遥感卫星地面站建立运行及升级扩充负责人。



**邵贝恩** 中科院遥感卫星地面站研究员。1970年毕业于北京清华大学,1981年在中科院高能所获硕士学位。近年来一直从事遥感卫星数据预处理系统的分析、研究以及开发工作。