第19卷 第

1997-09

ACTA OCEANOLOGICA SINICA

September, 1997

7

Vol. 19, No. 5

Sh -68

海洋卫星资料的地理定位及 相关几何参数算法研究\*

潘德炉 毛天明 李淑菁

(国家海洋局第二海洋研究所,杭州)

胸 要 卫星原始退感图像的应用都需要几何校正,即对遥感图像中的每个像元点都必须进行地理经纬度的定位、太阳及扫描仪的高度角和方位角的计算。通常由已知足够数量的地面控制点或近似的插值法来实现。对于广阔的海洋,很难找到地面控制点,因此以卫星的轨道参数和扫描仪的视场角等参数为基础,研究一套较完整的地理定位法和相关的几何参数法,大大地简化了现有几何校正的方法。经过美国海岸带水色扫描仪资料(CZCS)、甚高分辨率辐射计(AVHRR)和我国风云一号气象卫星资料(FY-1B)反演验证和局部区域的实际地面点对比表明,地理定位精度——纬度 RMS 为0.000 1°, 经度 RMS 为0.000 5°, 太阳的高度角和方位角的 RMS为0.000 7°, 完全可以满足气象和海洋等环境卫星及陆地资源卫星 MSS 等资料几何精校正的要求,同时可作为 TMT 和 SPOT 的粗几何校正。该算法不仅适用于升轨的卫星,而且也适用于降轨的卫星,同时还适用于前、后向倾斜和垂直等三种扫描状态的图像。

**关键词** 卫星扫描瓷料 遥感图像 地理定位 , 治 冷 , 几 何 孝 教 前 言

极轨遥感卫星在几百公里高空按一定轨道飞行,星载扫描仪所得到的扫描资料是一幅辐射值的数字矩阵图像。图像中的每一像元相当于地面确定的地理目标,通常用地理经纬度来描述。某些环境和资源卫星的原始资料没有相应的地理定位值,即使有(如 NOAA 的 AVHRR 资料),在每行2 048个像元中,也只有50个相间隔的像元定位点。目前用于地理定位的方法通常有两种。(1)采用地面控制点,用最小二乘方逼近定位,(2)采用插值法近似逼近。前者每幅图像需要一定量的地面控制点,其缺点是在远离海岸带的大洋很难找到足够多的已知地面控制点,因而降低定位精度,有时根本找不到地理控制点,无法定位。后者采用插值法,无

本文于1995-09-05收到,修改舊于1996-03-13收到。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金和国家航天办资助项目。

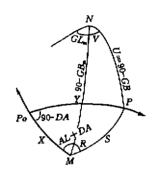
论是线性、双曲线或其他插值法,它们都建立在近似逼近的基础上,精度受到影响,同时又 费机时,干县,必需寻求一种新的可普遍应用于不同卫星扫描仪的地理定位方法和相关几何 参数计算算法.

# 地理定位算法

卫星相对自转的地球运动,星载扫描仪通过反射镜的旋转扫描获取地面信息形成遥感图 像,图像中的像元坐标所对应的地理坐标取决于以下二维运动,卫星沿轨道方向的前进运动 和扫描仪旋转镜垂直于轨道切线方向的扫描运动,因此,如果在一个条幅图像中已知一个像 元的地理坐标,利用卫星的轨道参数(卫星高度、轨道倾斜角、扫描倾斜角、过赤道时和轨 道的周期等)和扫描仪的视场角等参数(视场角、每行扫描点数和行扫描速度等),从原理上 讲可以推算出另一个像元点的地理坐标,设已知图像中心点的地理坐标为( $GB_m$ , $GL_m$ ),如 要推算图像坐标( $X_i$ , $Y_i$ )像元点的地理坐标(GB,BL),则需要作以下坐标变换,其演算 见图1:

- (1) 从图像平面坐标 (X, Y) 变换为以星下点为球心的球 面坐标(X,Y);
- (2) 从球面坐标 (X, Y) 变换为以星下点为极点的极坐标 (R, S);
- (3) 从极坐标 (R,S) 变换为以地球北极为极点的极坐标 (U, V):
- (4) 从极坐标(U,V) 变换为图像坐标为( $X_i$ , $Y_i$ ) 像元的 地理坐标 (GB, GL).

卫星飞行的轨道有两种,即升轨和降轨。扫描仪的扫描状态 有三种,即前、后向倾斜和垂直扫描。在地理定位算法的研究中 图1 卫星像元点在不同坐标 将考虑以上六种情况,为便于论述,在以下章节的算法推导中,从 升轨-垂直扫描状态入手,然后扩大到其他各种状态.



下的几何关系

#### 1.1 升轨-垂直扫描下的地理定位算法

由  $(X_i, Y_i)$  向 (X, Y) 坐标转换见图1和2,由于应用目的不同或卫星上其他技术需求 的不同,遥感器的光学结构有所不同,但是从原理上来分析则大同小异,通常情况下,来自 地物目标的入射,通过均速旋转的扫描镜反射到与飞行方向平行的主光学系统[1.2]。如图2所 示,旋转扫描镜的镜面 QB 与扫描镜的旋转轴 QO 成 $45^\circ$ . 在任何扫描状态下,进入主光学系 统的辐射始终沿着光学主光轴 QX 的方向、当垂直扫描时,扫描镜的旋转轴 QO 趋于水平,平 行于卫星飞行方向,光的入射角和反射角始终等于 $45^\circ$ ,即图 $2中 P_o$ 、 $P_\infty$ 和 $P_m$ 都重叠于卫星 的像底点 N,这时扫描平面 N 通过地心与地球表面垂直。在此,把轨道平面(即 XQN 平 面)与扫描平面 (PQN 平面) 之间的夹角称为扫描角. 在垂直扫描时 (图3),扫描角等于入 射线 PQ 与像底线 QN 间的夹角 T,可由下式计算:

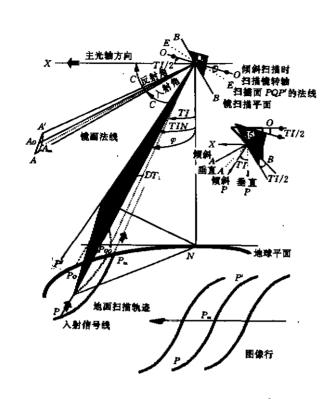


图2 在前向倾斜扫描状态下的立体图

$$T = \left(Y_i - \frac{NPIX}{2}\right) FY, \quad (1)$$

式中,T 是扫描角; Y; 是像元的列坐标(坐标由东到西); NPIX 是每行的总像元点数; FY 是瞬时视场角,FY = FOV/NPIX, FOV·是扫描的视场角.

由图3可知,以球心为中心的球 坐标为

 $Y = \arcsin(HR_1 \sin T) - T$ , (2) 式中,  $HR_1 = (H+R)/R$ , H 为卫星 飞行高度 (km), R 为地球半径 (取 6 371km).

从图像行坐标变换成卫星前进方向的球坐标时,必须考虑卫星对地物的相对运动,如图4所示. 卫星在沿轨道方向向前运动的同时,地球本身绕极轴向东以一定的角速度旋转. 设地球自转的角速度为 V., 卫星相对地物目标的相对速度为 V., 可由下式计算:

$$V_{r} = \arccos(\cos V_{s}\cos V_{s} - \sin V_{s}\sin V_{s}\sin AL), \qquad (3)$$

式中, $V_e$ 随纬度而变化, $V_e$ =cos $GB_m/0.004$  18;AL 是卫星飞行方向角(指北为零,向北飞行为正,向南飞行为负),这一角度随纬度变化:

$$AL = \arcsin\left(\frac{-\cos AKL}{\cos GB_a}\right),\,$$

AKL 为卫星发射倾斜角(指东为零,向北为正,向南为负);  $GB_{\bullet}$  是对应于图像中心点的卫星像底点纬度,在垂直扫描状态下,  $GB_{\bullet}$  =  $GB_{\bullet}$ ; DA 为卫星绝对速度  $V_{\bullet}$  与相对速度  $V_{\bullet}$  间的夹角,见图 4. DA 可由下式得到:

$$DA = \arccos\left(\frac{\sin V_{s} \cos AL}{\sin V} - AL\right). \tag{4}$$

卫星飞行方向的球坐标  $X_1$  可由  $V_2$  和像元所在的行坐标  $X_3$  求得:

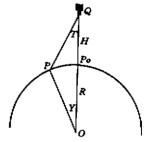


图3 在扫描方向以地球中 心为球心的球坐标

$$X = \left(X_{r} - \frac{NSCAN}{2}\right)V_{r} \cdot SD, \tag{5}$$

式中, NSCAN 是图像像元点所在的行数; SD 是行扫描周期 (单位为 s/行).

从(X,Y)向(S,R)坐标的变换如图1所示,在球面三 角形  $P-M-P_0$  中,利用正、余弦定理可得

$$S = \arccos(\cos X \cos Y + \sin X \sin Y \sin DA), \qquad (6)$$

$$R = \arcsin\left(\frac{\sin Y \cos DA}{\sin S}\right) - AL - DA. \tag{7}$$

从(S,R)向(U,V)坐标变换如图1所示,利用球面三角形 M-N-P 得

$$U = \arccos(\sin GB_{m}\cos S + \cos GB_{m}\sin S\cos R), \qquad (8)$$

$$V = \frac{\sin S \sin R}{\sin U}.$$
 (9)

从 
$$(U, V)$$
 向地理坐标  $(GB, GL)$  变换后的结果为  $GB = 90 - U$ ,  $GL = GL_m + V$ , (10)

式中,  $GB \neq P$  点的纬度 (北纬为正,南纬为负);  $GL \neq P$  点 的经度(西经为正, 东经为负); GL。是图像中心点的经度.

#### 1.2 倾斜扫描状态下的地理定位计算

为了避开太阳的反射光直接进入扫描仪、某些卫星的扫描 平面向前或向后倾斜一定的角度扫描,如 CZCS、Sea WiFS、

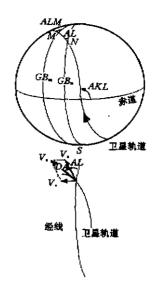


图4 卫星升轨情况下地面点 各相对运动的合成图

·OCTS 等都具有±20°前后倾斜扫描的功能. 在倾斜状态下,实际扫描面不再是平面,而是一 个圆锥面[3.4]. 倾斜扫描原理如图2, 当旋转扫描镜在轨道平面上倾斜 TI/2角度时,镜面法线 QA 也随之倾斜一个角度. 由于主光轴 QX 方向始终不变,同时根据入射角与反射角相等的定

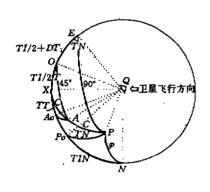


图5 在前向倾斜扫描状态下以卫星 为球心的各几何立体角的关系 成如图5所示。

律,这时扫描仪能观察的地物目标,即入射信号线 QP 的 方向完全由圆锥面 Q- $AA_mA'$  中的法线 QA 所决定。另外, 法线与旋转轴 QO 之间夹角固定在45°, 于是扫描行中每 一像元点的入射角和反射角都等于 C,但各像元点间的 C值不同. 相应于扫描行的地面轨迹是地球球面和部分圆锥 面  $Q-PP_mP'$  的相交线, 呈现一条曲线  $PP_mP'$ , 如图2所示. 对于扫描行中任一点 P, 在轨道平面上都存在一条直线 QE 垂直于法线,同时存在一个包括来自 PQ 的信号扫描 面 PQPo,该扫描面垂直于 QE. 对每一个像元点都是它自 己的扫描面,假设扫描面与轨道平面的相交直线为  $QP_{o}$ , 把 Q 点作为中心的球坐标,可以把以上讨论的关系描述

在倾斜扫描情况下, $(X_i, Y_i)$ 向(X, Y)坐标转换 中扫描角  $PQP_o$  (图5中的 TN) 不能直接运用1.1节中式 (2) 求得. 同时在倾斜扫描时,像 底点和图像中心点不重合, 所以也不能直接运用1.1节中式(3)和(4)求得, 这些参数可以 通过入射角和反射角 C 的计算来求得,由图5所示球坐标中,通过球面三角 AOX,利用余弦 定理可得

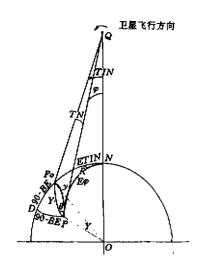
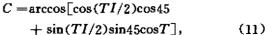


图 6 卫星飞行方向和在地球 球面上的方位角



式中,TI 为扫描倾斜角,通常由扫描仪技术参数来定;T 由式 (7) 求得.

图6中的 TT 是轨道平面和入射-反射平面间的夹角,可以通过球面三角 AOX 余弦定理求得

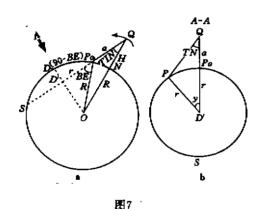
$$TT = \arcsin\left(\frac{\sin T \sin 45}{\sin C}\right). \tag{12}$$

图5中的 TN 是扫描角,可以通过球面三角 PEX 用 正弦定律求得

$$TN = \arcsin[\sin(2C)\sin TT].$$
 (13)  
(N (图7和8) 是扫描行中像元点  $P$  在轨道方面

图5中的 TIN (图7和8) 是扫描行中像元点 P 在轨道方面的倾角投影,可通过图5中球面三角 PEX 求得

$$TIN = TI + DT_1 + \arcsin \frac{\cos(2C)}{\cos TN},$$
 (14)



.

- a. 卫星飞行轨道平面与地球球面的截面
- b. 扫插仪扫插平面与地球球面的截面

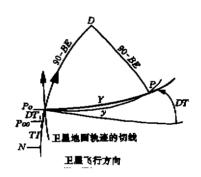


图8 像元相对于扫描行中心点在卫星飞行方向 球面剪切立体角 DT 的示意图

球坐标 Y 可以通过扫描平面  $PQP_o$  与地球球面的截面——以 D' 为圆心、r 为半径的圆平面中的圆弧 y 来求得,如图7所示。由图7可知,在圆截面中的圆弧 y 即  $PP_o$  为

$$y = \arcsin(AR1\sin TN) - TN, \tag{15}$$

式中,

$$AR1 = \frac{a+r}{r} = HR1 \frac{\cos TIN}{\cos BE},\tag{16}$$

$$BE = \arcsin(HR1\sin TIN), \tag{17}$$

然后可以从 y 中求得球坐标 Y:

$$Y = 2\arcsin[\cos BE\arcsin(y/2)]. \tag{18}$$

与垂直扫描情况相比,扫描平面斜切于地球球面,产生  $P_{o}$ -P 圆弧相关线,从而在飞行方向产生一个角度增量 DT (见图7和8),图1中角  $MP_{o}$ P 的增量等于90—DA+DT. DT 可以从图8中球面三角 ( $P_{o}DP$ ) 中通过余弦定理求出:

$$DT = \arcsin \left[ \operatorname{tg} BE \left( 1 - \frac{\cos Y}{\sin Y} \right) \right]. \tag{19}$$

P 点球坐标相对于  $P_m$  点,相应于 DT 有一坐标增量 DX,如图9所示。由于行扫描的周期不变,图2中的  $P_{\infty}$ 与  $P_m$  重合于  $P_m$  点,如图9所示,DX 由下式计算:

$$DX = BE - TIN - XO, (20)$$

式中,

$$XO = \arcsin(HR1\sin TI) - TI. \tag{21}$$

倾斜扫描下的极坐标 (R, S) 可以改变式 (6) 和 (7) 来 求得,图1中  $MP_0P$  为90-(DA-DT),则有

$$S = \arccos[\cos(X + DX)\cos Y]$$

$$+\sin(X+DX)\sin Y\sin(DA-DY)$$
, (22)

$$R = \arcsin \left[ \frac{\sin Y \cos (DA - DT)}{\sin S} \right] - AL - DA. \quad (23)$$

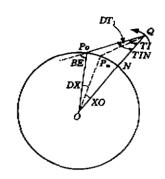


图9 像元相对于行中心点在 卫星飞行方向的球坐标

由 于斜倾扫描像底点 N 和像中心点 M 重叠,AL 可通过式 (3) 计算得到,像底点的纬度 如图4所示,可通过球面三角 MSN 余弦定律得到:

$$GB_{n} = \arcsin(\sin ETIN\cos GB_{m}\cos ALM - \sin GB_{m}\cos ETIN), \qquad (24)$$

式中,

$$ALM = \arcsin\left(\frac{\cos AKL}{\cos GB_m}\right),\tag{25}$$

ETIN 如图6所示,为球面三角形  $PP_oN$  中  $P_oN$  和 N 间的夹角,可通过 TIN 求得:

$$ETIN \approx \arcsin(HR_1 \sin TIN) - TIN.$$
 (26) 最后通过式 (8)、(9) 和 (10) 计算得到  $GB$  和  $GL$ .

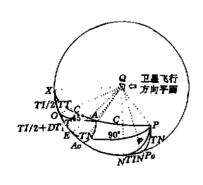


图10 在后向倾斜扫描状况下 以卫星为球心的各几何 天体角之间的关系

在后向扫描情况下,即  $TI < 0^\circ$ ,旋转扫描镜轴 QO 在轨道平面朝后向斜倾 T1/2角度。随着后向倾斜,扫描线、旋轴镜平面法线以及法线的包络面都相应地朝后向倾斜一个角度。与前向倾斜扫描一样,由于主光学系统轴线 QX 方向不变,同时入射角等于反射角,于是信号扫描面朝飞行的反

不变, 同时入射用等于反射用, 于是信号扫描面明《行的反方向倾斜, 各种几何角度的关系如图10所示. 由图10知, 在球面三角 AOX 中利用余弦定律可推导出每个像元点的入射和反射角 C 如下:

 $C = \arccos[\cos(TI/2)\cos 45 - \sin(TI/2)\sin 45\cos T],$ (27)

比较式 (27) 与 (13) 可知,当后向斜倾扫描时,只要改变此两式及式 (14)  $\sim$  (26) 中 TI 的符号,就可以用于后向

斜倾扫描时的计算公式.

## 1.3 升轨和降轨情况下的定位

卫星飞行轨道分为升轨与降轨两种. 为了补偿地球自转的位移,从东北到西南的降轨,如 AVHRR、FY-1B、Sea WiFS,或从东南到西北的升轨,如 CZCS.

在1.1和1.2节已对升轨情况作了讨论,就地理定位原理和计算算法而论,无论升轨还是降轨都一样,只要在1.1和1.2节所讨论的公式中,把有关轨道倾斜角 AKL 变为180-AKL,卫星飞行的角速度 V,取负号,就适用于降轨情况下的地理定位.

## 2 图像的地理定位过程

在上节算法的推导中,作了两个假设:(1)已知图像中心点的地理坐标;(2)卫星飞行方向角保持不变,即用图像中心点的卫星飞行方向角代替所有图像行的中心点的卫星飞行方向。

但在实际图像处理中,不一定已知图像中心点的地理坐标。另外,卫星飞行方向实际上随着纬度的变化而变化,这就影响以上算法的精度。为此,作整幅图像地理定位时,在处理过程中有必要改进某些计算和确定处理过程,以能满足在已知图像中任一点时就能实现高精度定位。整幅图像地理定位计算过程如下:

- (1) 在所要处理的图像中,根据先验知识,找到任一已知点或轨道报的降交点或升交点作为地理定位参考点,它的图像坐标为( $X_{i,ret}$ ,  $Y_{i,ret}$ ),而该像元的地理坐标为( $GB_{ret}$ 、 $GL_{ret}$ ).
- (2) 把  $X_{i,ref}$ 这一行作为一个像幅看待,用1. 2节所述的算法计算该参考点像元所在行的中心像元点的地理坐标( $GB_{m,ref}$ , $GL_{m,ref}$ )和参考行的飞行方向角为  $AL_{ref}$ .
- (3) 以参考行的中心像元点作为像幅中心点,计算相邻行的中心像元点地理坐标  $(GB_m[X_{i,ret}+1],GL_m[X_{i,ret}+1]$ 和卫星的飞行方向  $AL(X_{i,ret}+1)$ ,然后运用以上所得结果推算下一个相邻行的中心像元 $GB_m[X_{i,ret}+2],GL_m[X_{i,ret}+2]$ 和  $AL[X_{i,ret}+2]$ . 按此类推计算,得到整幅图像的每一行中心像元的地理坐标和飞行方向,即  $GB_m[X_i]$ 、 $GL_m[X_i]$ 和  $AL[X_i]$ .
- (4) 以每行中心像元为基础,推算每行每一像元的地理坐标,即由  $GB_m[X_i]$ 、 $GL_m[X_i]$ 和  $AL[X_i]$ 推算得到  $GB[X_i, Y_i]$  和  $GL[X_i, Y_i]$ .

以上算法和计算过程的主要误差来自第二步,因为通常只知道参考点的地理坐标,而不知道卫星相对该点的所在行的中心点的飞行方向。为了减少这一误差,在第二步计算中采用逐步逼近法,即以  $GB_{ret}$ 和  $GL_{ret}$ 为基础推算  $GB_{m,ret}$ 、 $GL_{m,ret}$ 和  $AL_{ret}$ ,然后以  $GB_{m,ret}$ 、 $GL_{m,ret}$ 和  $AL_{ret}$ 倒推算出参考点  $[X_{l,ret}, Y_{l,ret}]$  的地理坐标 $[GB'_{ret}, GL'_{ret}]$ 。比较已知的 $(GB_{ret}, GL_{ret})$ ,根据两者偏差  $\Delta GB_{ret}$ 和  $\Delta GL_{ret}$ ,取中间插值法得到  $GB_{ret}$ (1)和  $GL_{ret}$ (1),再以  $GB_{ret}$ (1)和  $GL_{ret}$ (1)为基础重算  $GB_{m}$ (1)、 $GL_{m}$ (1)和  $GL_{ret}$ (2),一直循环推算直至与  $GB_{ret}$ 和  $GL_{ret}$ 的误差达到一门限值为止[2],然后,由  $GB_{m,ret}$ 和  $GL_{m,ret}$ 推算出所有行的中心像元点地理坐标和卫星飞行方向。

此外,原先的算法中,误差的另一来源是以全幅图像中心点的 AL 角代替图像所有行中心

点和卫星飞行方向角引起的. 经过上述改进后,通过每行像元中心点逐行计算卫星飞行方向角 AL 的演算过程,就大大减小了算法中的误差.

# 3 扫描仪和太阳的高度角及方位角的算法

卫星飞行中,图像像元相应地面点的扫描仪和太阳的高度角与方位角,可以从以上章节 来推导像元地理定位的某些中间结果.

#### 3.1 扫描仪的高度角

为描述和计算卫星扫描线到达地面的高度角,如图11画出以地球为中心的一天体图,图中 P 为相应像元的地球表面点,Pc 为 P 点的法线,QP 为扫描线,OPPc 即为 P 点扫描仪的高度角.这个高度角可以通过图6、7和10中所示的扫描视角  $\varphi$  来求得, $\varphi$  取决于扫描角 TN 和扫描倾斜角 TIN,而 TIN 和 TN 又取决于 C,所以图6所示的  $\varphi$ 可以通过球面三角形 PXN,利用余弦定理按下式求得,

$$\varphi = \arccos[\sin(2C)\cos TT] \qquad (TI \neq 0^{\circ}). \tag{28}$$

在扫描仪垂直扫描情况下, $TI=0^{\circ}$ , $TIN=0^{\circ}$ ,

C=45°,由式(13)、(14)和(15)得

$$\varphi = T \qquad (TI = 0^{\circ}). \tag{29}$$

像元 P 点扫描仪的高度角计算原理如图 7a 所示,相当于用  $\varphi$ 代替图 7a 中的 TIN,扫描 仪高度角即相当于图 7a 中的 BE 角,可以改变式(19)中的参数计算:

$$Zenith_{\text{scanner}} = \arcsin(HR_1 \sin \varphi). \tag{30}$$

#### 3.2 扫描仪的方位角

P 点的天体水平面是一个通过地球球心并垂直于 P 点法线的一个平面,如图11所示,扫描仪的方位角计算是根据轨道平面和  $P_{C}$  PQ 平面在 P 点的天体平面上相交夹角  $\beta$ ,利用球面三角形  $PNP_{O}$  用余弦定理求得:

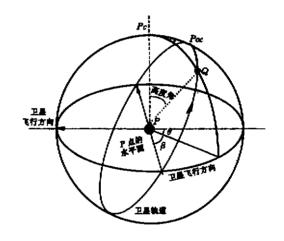


图11 卫星像元相对于地面的高度角和方位角

$$\beta = \arccos \frac{\left[\cos ETN - \cos ETN\cos(E\varphi)\right]}{\sin ETIN\sin(E\varphi)},$$
 (31)

式中、ETN=Y,  $E\varphi$ 可通过扫描视角  $\varphi$ 用下式求得:

$$E\varphi = \arcsin(HR1\sin\varphi) - \varphi. \tag{32}$$

在垂直扫描情况下:

1).

$$TI = 0^{\circ}, \quad TT = T, \quad TN = T,$$

由式(11)、(12)和(13)得

$$\beta = 90^{\circ}$$
.

为把方位角归一化到统一坐标,设定地球南极方向为0,以东为正,以西为负.为了把 $\beta$ 转换到统一的方位坐标,把扫描行两端和中心像元点按卫星的不同飞行方向和前后方向不同倾斜扫描分别由图13~14所示,归一化后的方位角,可由 $\beta$ 和卫星的飞行方向角得到

$$Azimuth_{senner} = AL + \beta. \tag{33}$$

#### 3.3 太阳的高度角[5]

P 点的太阳高度角可由卫星过境日期、时刻和 P 点的经纬度,由以下公式逐步求得。地球围绕太阳按圆轨道运动,年内不同日期天角为

$$K = \frac{2\pi(DN - 1)}{365},\tag{34}$$

式中,DN 为儒历日. 不同时期的太阳倾角  $\alpha$  为

 $\alpha = [0.006 918 - 0.389 912\cos K + 0.070 257\sin K - 0.006 758\cos(2K)].$ 

+ 0.000 907sin(2K) - 0.002 697cos(3K) + 0.001 
$$48\sin(3K)$$
]  $\frac{180}{\pi}$ , (35)

由天角 K 计算不同日期等效时 ET (单位, min),

$$ET = [0.000\ 075 + 0.001\ 868\cos K - 0.032\ 077\sin K - 0.014\ 615\cos(2K) - 0.040\ 89\sin(2K)] \cdot 229.18.$$
 (36)

太阳地方时 TST 由下式求得 (单位, h).

$$TST = \frac{-GL}{15} + \frac{ET}{60} + GMT, \qquad (37)$$

式中,GMT 为 GMT 标准时. 太阳的上升角  $\Omega$  (°) 为

$$\Omega = (12 - TST) \cdot 15. \tag{38}$$

最后太阳高度角由下式求得:

$$Zenith_{sun} = \arccos(\sin\alpha\sin GB + \cos\alpha\cos GB\cos\Omega). \tag{39}$$

### 3.4 太阳的方位角

P 点归一化的太阳方位角由太阳的高度角、太阳偏角及 P 点的纬度决定,由下式计算得到:

$$Azimuth_{sen} = \arcsin\left(\frac{\cos \varphi \sin GB - \sin \alpha}{\sin \varphi \cos GB}\right). \tag{40}$$

方位角的符号定义为  $\Omega=0^{\circ}$ 时,太阳方位角为 $0^{\circ}$ , $\Omega>0^{\circ}$ 时为正, $\Omega<0^{\circ}$ 时为负.

#### 3.5 太阳和扫描仪之间的方位角

太阳和扫描仪之间的方位角定义为扫描视平面(扫描仪—地面像元点—扫描仪像底点)和 太阳视平面之间的夹角(太阳—地面像元点—太阳底点),在垂直扫描情况下如图12所示;在 升轨时前后倾斜扫描状况如图13;在降轨时前后倾斜扫描状况如图14.它可由以下公式求得。

$$Azimuth_{diff} = |Azimuth_{son} - Azimuth_{scanner}|. (41)$$

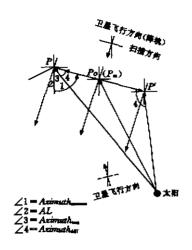


图12 扫描仪垂直扫描状况下太阳和 扫描仪的方位角

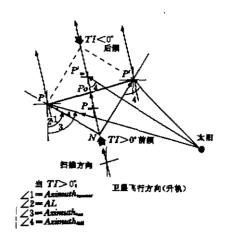


图13 卫星升轨时扫描仪倾斜扫描状况下 太阳和扫描仪的方位角

# 4 地理定位及相关几何参数的软件包

所在地理坐标的定位、太阳和扫描仪的高度角及方位角等相关几何参数的计算都集于一个软件包,在该软件包中已包括了处理 CZCS、SeaWiFS、AVHRR、FY-1B、ROCSAT-1等

多种星载传感器原始资料的地理定位和相关几何参数 计算.程序开始运行时通过人机对话选择所要处理资料 的类型,然后输入所要处理的图像尺寸、起始行列、结 束行列、行列的增量、参考点行列、地理坐标和卫星过 境时间等.该软件包包括四大部分:

- (1) 通过参考点计算它所在行的中心点地理坐标和 卫星飞行方向;
- (2) 通过参考行的中心点计算每行中心点的地理坐标和卫星飞行方向;
- (3) 计算行中每行像元点相对应的行中心点在扫描 方向的球坐标增量、在飞行方向的切变和坐标增量 *DX*, 并列表;
- (4)最后,逐行计算每一像元点的地理坐标  $GB[X_i, Y_i]$ 、 $GL[X_i, Y_i]$ 、扫描仪高度角和方位角. 表1为 SeaW-iFS 升轨在20°前向倾斜下扫描的计算结果.

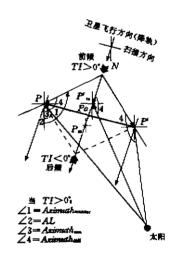


图14 卫星降轨时扫描仪倾斜扫描状 况下太阳和扫描仪的方位角

表1 SeaWiFS 升轨20°前向倾斜扫描下典型像元的 地理定位及几何参数计算结果

傾斜角		视场角	扫描	<b>う数</b> 包	<b>存行像元數</b>	日井	朔	时刻	
20. 00°  X <sub>1,rel</sub> =8 001		116-60°	. 16 0	00	1 285	03-	21	12:00:00	
		Y <sub>1,ref</sub> = 643		$GB_{\rm ref} = 0.00$		GL <sub>ref</sub> = 0.00			
$X_{i,\text{mat}} = 8 001$		Y <sub>1,mat</sub> = 643		$GB_{\rm m}=0.00$		$GL_{m}=0.00$			
<u> </u>				卫星	 卫星	太阳	太阳	卫星-太阳	卫星飞行
行	<b>惊</b> 元	纬度	经度	方位角	高度角	方位角	高度角	方位角	方向角
1	51	77.29	25- 64	54.04	84- 06	33. 81	79.45	20. 23	-47.7
1	643	77.21	-49.97	-227.74	22.33	-43.15	80. 66	175. 42	-47.7
1	1 235	59. 69	<b>- 79. 35</b>	-149-51	84. 06	-74.15	81.00	75. 37	- 47. 7
1 601	51	64- 50	24.80	81. 58	84.06	33. 86	68- 46	47. 73	-20.2
1 601	643	63. 41	-21.95	-200. 20	22. 33	-17.26	64. 51	177. 07	<b> 20. 2</b>
1 601	1 235	52-82	-54.99	-121.97	84. 06	-54.86	66-49	67. 12	-20, 2
3 201	51	49. 71	17-85	88. 92	84-06	29. 25	53. 58	59- 67	-12.8
3 201	643	47- 85	-12.73	-192.85	22- 33	-9.96	48. 35	177- 11	-12.8
3 201	1 235	41. 34	<b>— 39.</b> 57	-114.63	84.06	-45.84	51.71	68- 79	-12.8
4 801	51	34.55	16.44	91-84	84- 06	33. 52	39.63	58- 32	- 9. 9
4 801	643	31.98	<b>-7.46</b>	-189.94	22. 33	<b>—6.</b> 15	32. 20	176. 22	-9.9
4 801	1 235	27.83	<b>-30.16</b>	-111.72	84-06	-46.14	- 37-40	65. 57	-9.9
6 401	51	19, 31	17. 33	93. 14	84- 06	48. 26	27. 85	. 44.88	-8.6
6 401	643	16.01	-3.50	<del></del> 188. 64	22.33	-1.53	16.08	172-89	-8.6
6 401	1 235	13.41	24. 08	-110.42	84-06	-58.74	24. 79	51.68	<del>-</del> 8. 6
8 001	51	4. 13	19. 69	93. 57	84. 06	79.54	22. 04	14. 03	-8.2
8 001	643	0.00	0.00	-188.21	22. 33	88- 08	1.97	83-71	-8.2
8 001	1 235	-1.47	- 20. 01	-109.98	84.06	<b>- 94. 30</b>	18.10	15. 68	-8.2
9 601	51	-10.86	23. 46	93. 34	84.06	112. 50	26. 47	19. 16	8.4
9 601	643	-16.01	3.47	<b> 188- 44</b>	22. 33	164. 60	16, 51	6- 95	- 8. 4
9 961	1 235	-16.57	-17.43	-110. 22	84. 06	<b>— 133. 66</b>	23. 23	23.44	-8.4
11 201	51	- 25.49	-29.08	92. 33	84.06	127. 95	37.69	35- 63	-9.4
11 201	643	-32.00	7. 33	-189.45	.22, 33	166-79	32. 63	3. 76	-9.4
11 201	1 235	<b>-31.</b> 73	-16.34	-111.23	84. 06	-150.41	35. 34	39. 18	<b> 9. 4</b>
11 801	51	- 39. 40	37. 68	90. 01	84.06	130.77	51.43	40. 76	-11.7
12 801	643	-47. 91	12. 33	-191.77	22. 33	165. 36	48.78	2. 87	-11.7
12 801	1 235		-17.42	-113.55	84.06	-154.94	49-51	41.39	-11.7
14 401	51	-51.80		84, 45	84.06	123. 95	66. 20	39.50	-17.3
14 401	643	-63.60	20. 67	-197.33	22. 33	159-85	64. 95	2.83	-17.3
14 401	1 235	-61.25	<b>-23.29</b>	-119.11	84- 06	-151.15	64. 27	32- 04	-17.3
16 000	51	-60.81	76. 62	64. 26	84. 06	104.88	81.76	40-62	-37.5
16 000	643	<b>-78.21</b>	44-75	~217.51	22. 33	138- 22	81.09	4. 26	-37.5
16 000	1 235	<b>-73.38</b>	-44.09	-139.29	84. 06	-131.09	78.83	8. 20	-37.5

北纬为正,南纬为负,西经为正,东经为负,太阳和卫星的方位角,南极方向为0,东为正,西为负,卫星方向角,北极方向为0,东为正,西为负,

# 5 算法验证及结果

推导算法已用于 CZCS、FY-1B、SeaWiFS 和 AVHRR (NOAA-10, NOAA-11) 卫星原始资料的地理定位和几何参数计算,以上资料的有关轨道和扫描仪参数见表2. 用以下方法检验其算法精度.

卫星参数	CZCS	FY-1B	SeaWiFS	NOAA-10	NQAA-11
视场角 (°)	78.68	110. 86	116-6	110.8	110. 8
軌道周期 (min)	104.07	102.76	98. 88	101. 277	102-139
轨道倾角 (°)	99.28	98. 9	98. 2	98.66	98. 91
扫描速率(s/行)	0. 123 75	1/6	1/6	1/6	1/6
平均高度(km)	955	888.8	705	813	855
飞行方向	<i>,</i> 升軌	降轨	降軌	降執	降軌
发射窗口	11,00	07:55	12:00	07:32	13:49
像元數/行	1986	2048	1285	2048	2048
扫描倾角 (*)	0, ±20	0	0, ±20	0	0

旁2 卫星轨道和扫描仪参数

资料、 $16\,000$ 行条带图像、为了便于检验、取条幅图像的中心点为卫星的上交点或降交点  $GB_{ref}=0^{\circ}$ 和  $GL_{ref}=0^{\circ}$ . 为了便于验证太阳和传感器的高度角、方位角和卫星飞行方向的精度、取6月1日(夏至)为卫星过境日期、

步骤:(1)以像幅图像中心点作为 参考点,推算出整个条幅所有像元的地 理坐标及有关几何参数;(2)分别以开 始行(第1行)、中间行(第8 001行)和 最后一行(第16 000)的第一像元、中心 像元和最后一个像元点作为参考点,取 第一步得到的地理坐标,反推算整个条 幅图像的中心点的地理坐标和太阳高度 角、方位角;(3)求出第二步中不同像 元点作为参考点下反演的误差和误差均

表3 算法验证结果

参 敷	最大误差(*)	均方根误差(*)	
纬度	0. 000 14	0.000 10	
经度	0.000 60	0.000 50	
太阳高度角	0.000 76	0.000 70	
太阳方位角	0.000 77	0.000 70	
飞行方向	0. 000 80	0.000 70	

方根值;(4)选取实际接收到的图像进行地理定位计算,并与局部区域实际地理坐标对比验证. 按表中所列五种资料,其中 CZCS 和 Sea WiFS 包括前、后斜倾和垂直等三种扫描状态,共取2 592个反演验证点和实际地理验证点. Sea WiFS 尚未入轨,未作实测资料对比,验证结果如表3.

## 6 结论

- (1) 经过五种卫星资料的验证表明,以卫星轨道参数和扫描仪的视场参数为基础,建立 地理坐标定位和相关几何参数的算法是可行的;
- (2) 本文所研究的算法和软件适用性广,既适用于升轨卫星,也适用于降轨卫星,同时还适用于在前、后向倾斜和垂直三种扫描状态下获取的地面资料。
- (3)本算法和处理软件使用简便,大大简化了通常的几何校正方法。对整个条幅图像只要输入一个已知参考点,便可对整幅图像的所有像元点进行地理定位;
- (4)气象和海洋这类环境卫星的星下点地面分辨率通常为1km 左右,陆地资料卫星 MSS、TMT、SPOT 的地面分辨率分别为56~79、30和20m、由验证所知,本研究成果在纬度方向的误差为0、000 14°,经度方向为0.000 60°. NOAA 卫星高度相当于地面的误差为15.4±66m,确保了 NOAA 等环境卫星的几何定位误差在一个像元内,因此,本研究的地理定位精度可以完全满足环境卫星和陆地卫星的 MSS 资料的精几何校正,同时可以满足 TMT 和 SPOT 的粗几何校正的要求;
- (5) 在本算法的基础上,再加上每行的卫星姿态参数(滚、偏、仰角),有潜力提高定位精度,以便满足 TMT 和 SPOT 等甚高地面分辨率的陆地资源卫星的几何校正要求。

### 参考文献

- 1 Gong Huixing. Visible-infrared scanning radiometer on FY-1 meteorological satellite and its technical advances. Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(2); 87~100
- 2 Zeng Qinbo, Xu Xuerong. Optical design of the remote sensing instrument for FY-1 meteorological satellite. Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(2); 101~110
- 3 Nelder J A, R Mead. A simplex method for function minimization. The Computer Journal, 1965. (7): 308~313
- 4 NASA. Nimbus-7 CZCS derived products scientific algorithm description. NASA. Rep. EAC-T-8085-0027, printed in NASA, GSFC, Greebelt, Maryland, 1978, 1~155
- 5 Muhammad Iqbal. Sun-earth astronomical relationship. In, An Introduction to Solar Radiation. Toronto, Academic Press, New York, 1981, 3~22