

文章编号: 1007-4619 (2005)02-0138-05

姿态偏离对 AVHRR 图像导航的影响

王光辉, 徐世昌, 陈 标

(海军潜艇学院 物理教研室, 山东 青岛 266071)

摘 要: 在卫星遥感中, 需要校正因地球形状、地球自转、卫星轨道变化以及姿态偏离等因素造成的图像畸变。分析了卫星姿态偏离对 AVHRR 图像横向比例畸变和纵向扭曲畸变的影响, 指出与地球曲率一样, 卫星滚动也可使图像产生横向比例畸变, 并提出了相应的校正模型。

关键词: AVHRR 图像; 姿态偏离; 横向比例畸变; GCPs/GCBs

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引 言

AVHRR 是从 850km 上空的太空轨道上, 通过 $\pm 55.358^\circ$ 扫描角对地面进行探测的^[1], 因此, 地球形状、自转、卫星速度、姿态变化、轨道偏移, 传感器扫描角的非线性误差和采样延迟等均可引起图像畸变。

目前 AVHRR 图像的几何校正方法主要可分直接定位^[2], 导航定位^[1-4] 以及基于地面控制点 (GCPs) 或地面控制块 (GCBs) 进行图像变换的几何精校正^[5-7] 3 类, 其中, 前两类校正方法融入了卫星姿态信息。

作为 NOAA/AVHRR LIB 数据的一般用户, 由于不需要卫星轨道信息, 第 3 类方法易于实现。在海洋遥感中, 一般选用特定的海岸线或岛屿作为 GCPs/GCBs, 但是 GCPs/GCBs 往往不能满足空间均匀分布的要求, 另外, 加上云的因素, 可供选择的 GCPs/GCBs 也往往受到很大的限制。因此, 在海洋遥感中, 单纯利用几何精校正, 无法实现对大面积遥感图像畸变的校正。对此, 本文通过分析卫星姿态偏离对 AVHRR 图像导航的影响, 提出了相应的解决方案。

2 地球曲率引起的 AVHRR 图像的横向比例畸变

由于地球曲率的影响, 使得步进扫描传感器

AVHRR 的图像产生横向比例畸变^[3]

$$x = R\beta \quad (1)$$

$$\beta = \arcsin\left[\frac{R+h}{R}\sin\alpha\right] - \alpha \quad (2)$$

其中, x 为扫描点沿扫描行方向偏离星下点的距离; β 为星下点-地心-扫描点之间的夹角; h 为卫星高度; R 为地球半径; α 为扫描角 (扫描点-卫星-星下点所张角度, 取向左为正, 同时考虑卫星是自右至左扫描的)。设 $\Delta\alpha$ 为卫星扫描的步进角, n 为扫描点序号, 并满足

$$\alpha = (n - 1024.5) \Delta\alpha \quad (3)$$

由式 (1), (2), (3) 式可见, 虽然扫描角随扫描点序号线性增大, 但对应的地心角的变化却是非线性的, 当扫描角较大时尤其明显。

3 卫星姿态偏离对图像导航的影响

由于卫星姿态的偏离, AVHRR 在实际扫描时, 星下点 S 、扫描点 P 均可能偏离预期位置, 分别到达 S' 和 P' 点, 如图 1。下面, 分别从卫星的滚动角、偏航角、俯仰角三方面分析卫星姿态偏离对图像导航的影响并建立相应的卫星姿态校正模型。

3.1 滚动角的影响

当 AVHRR 绕航行方向为轴发生滚动时, 改变了各个扫描点所对应的扫描角, 相应 (3) 式可修正为:

$$\alpha = (n - 1024.5) \cdot \Delta\alpha + \delta\alpha \quad (4)$$

收稿日期: 2003-12-18; 修订日期: 2004-03-03

作者简介: 王光辉 (1971—), 男, 硕士, 讲师, 1998 年 7 月毕业于曲阜师范大学激光研究所光学专业。自 1998.9 以来, 一直从事海洋遥感的研究, 并承担了海军潜艇学院研究生班《遥感原理》课的教学工作。在遥感领域已发表论文一篇。

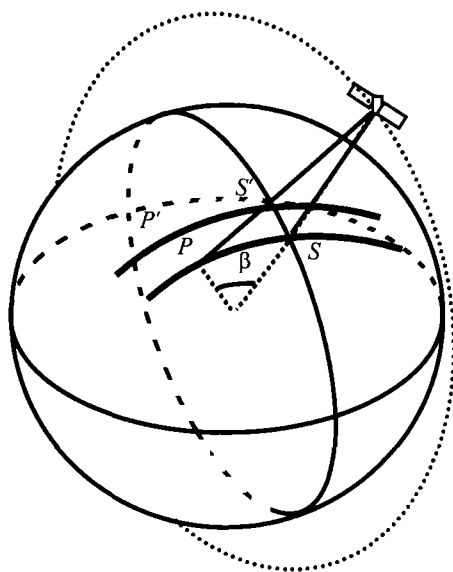


图 1 卫星姿态偏离对星下点和扫描点位置的影响

Fig. 1 The effect of satellite attitude deviation on nadir and scan spot position

其中, $\delta\alpha$ 为卫星的滚动角, 亦即 S' 点所对应的扫描角。由于 β 角与 α 角的非线性关系, $\delta\alpha$ 成为 AVHRR 图像产生横向比例畸变的另一重要原因。 $\delta\alpha$ 取不同值时 AVHRR 扫描行各个扫描点偏离第 1024 扫描点的距离如图 2, 其中, h 取 850km, R 取 6371km (中纬度地区地球半径)^[8], $\Delta\alpha$ 取 $0.94398814 \times 10^{-3}$ rad。可见, 由于 $\delta\alpha$ 的影响, 扫描行两侧各个扫描点偏离第 1024 扫描点的距离发生变化, 使得一侧被横向压缩, 另一侧被横向放大。滚动角所引起的横向缩放比例如图 3, 从图中可以看出, $\delta\alpha$ 产生的图像的横向比例缩放非常显著, 而且 $\delta\alpha$ 越大, 扫描点序号偏离 1024 越多, 横向缩放比例越大。

3.2 偏航角的影响

偏航角偏离使得 AVHRR 扫描行绕星下点发生旋转, 使得图像在星下点轨迹两侧产生纵向扭曲。

$$\Delta y = x\delta\gamma \tag{5}$$

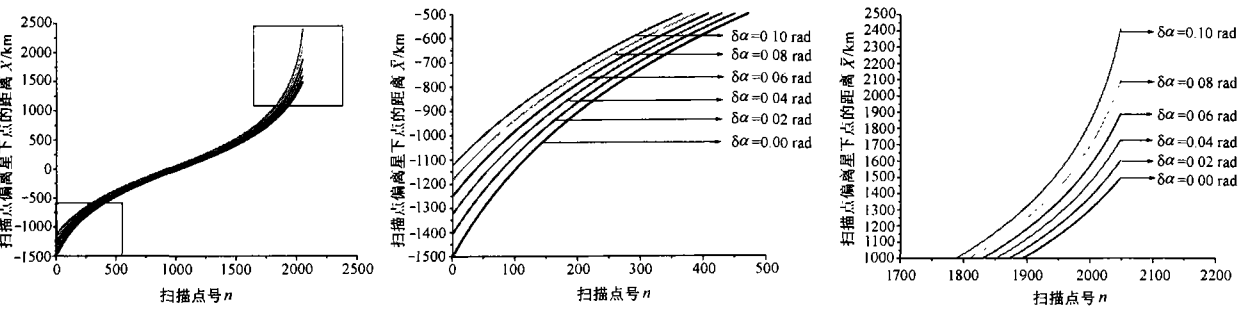


图 2 滚动角对 AVHRR 扫描行扫描点横向位置的影响

Fig. 2 The effect of rolling angle on scan spot transverse position of AVHRR scan line.

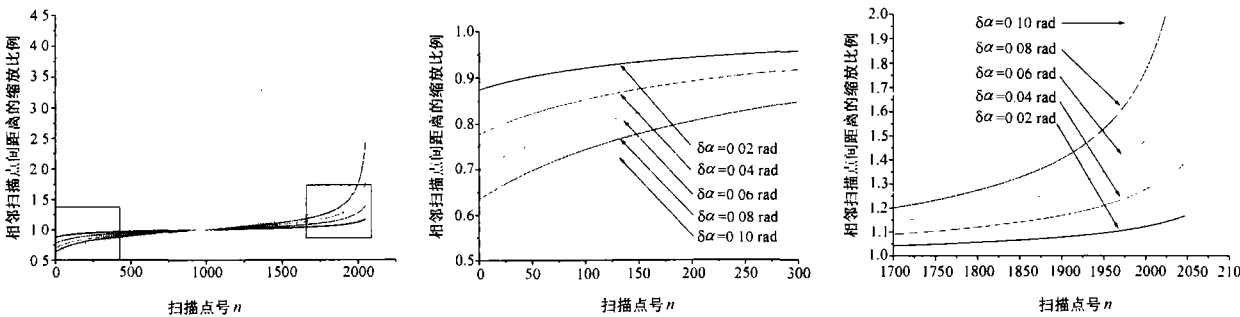


图 3 滚动角引起的 AVHRR 扫描行的横向缩放

Fig. 3 The transverse zoom of AVHRR scan line caused by rolling angle

其中, $\delta\gamma$ 为卫星的偏航角, 取逆时针方向为正, $\delta\gamma$ 取不同值时对 y 的影响如图 4。由于偏航角的影响

响,扫描点位置沿卫星运动方向和逆卫星运动方向在星下点轨迹两侧产生扭曲。

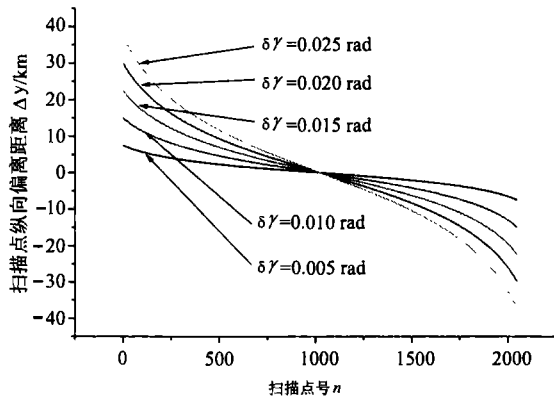


图 4 偏航角对扫描点纵向位置的影响

Fig. 4 The Effect of yaw angle on scan spot portrait position.

3.3 俯仰角的影响

俯仰角使 AVHRR 扫描行沿星下轨迹方向发生平移,对图像畸变的影响较小。

4 实例分析

我们取 AVHRR 的扫描步进角 $\Delta\alpha$ 为 $0.94398814 \times 10^{-3} \text{ rad}$, 卫星高度为 833km (当图像扫描时间为 15.5 min 时) 或 870km (当图像扫描时

间为 16 min 时), 轨道倾角为 98.9127° , 地球半径为 6378.16 km ^[2]。选取 NOAA14 卫星, 北京时间 1997 年 5 月 31 日 13 点 36 分由国家海洋局第一海洋研究所卫星地面接收站接收的 AVHRR 数据, 利用 MCSST 进行海表温度反演^[9,10], 不考虑卫星姿态偏离, 由 (1), (2), (3) 式进行地球曲率校正, 获取 AVHRR 图像, 以山东半岛为 GCB 进行平移校正, 并与实测海岸线相比较, 结果如图 5(a)。由图 5(a) 我们可以得出如下结论:

(1) 图像的几何畸变较小, 仅仅通过简单的平移校正即可获取较好的校正效果;

(2) 中国大陆海岸线与实测海岸线重合非常好, 图像的纵向比例畸变不明显;

(3) 朝鲜半岛、日本群岛海岸线与实测海岸线沿纬线方向有所偏离, 图像存在明显的横向比例畸变;

(4) 进行地球曲率校正后仍存在的横向比例畸变极有可能是由卫星的滚动角引起的。

为了校正卫星滚动角引起的图像横向比例畸变, 我们采用地心旋转坐标系与卫星轨道坐标系间坐标变换的方法来建立卫星姿态校正模型^[11]

$$\lambda_p = \lambda_s - \arctan(\tan \lambda_p \cdot \cos i) + \arctan \frac{\cos \Phi_p \sin \lambda_p \cos i - \sin \Phi_p \sin i}{\cos \Phi_p \cos \lambda_p} \quad (6a)$$

$$\Phi_p = \arcsin[\cos \Phi_p \sin \lambda_p \sin i + \sin \Phi_p \cos i] \quad (6b)$$

其中, $S(\lambda_s, \Phi_s)$ 、 $P(\lambda_p, \Phi_p)$, $S(\lambda'_s, \Phi'_s)$ 、 $P(\lambda'_p, \Phi'_p)$ 分别表示星下点 S、扫描点 P 在地心旋转坐标

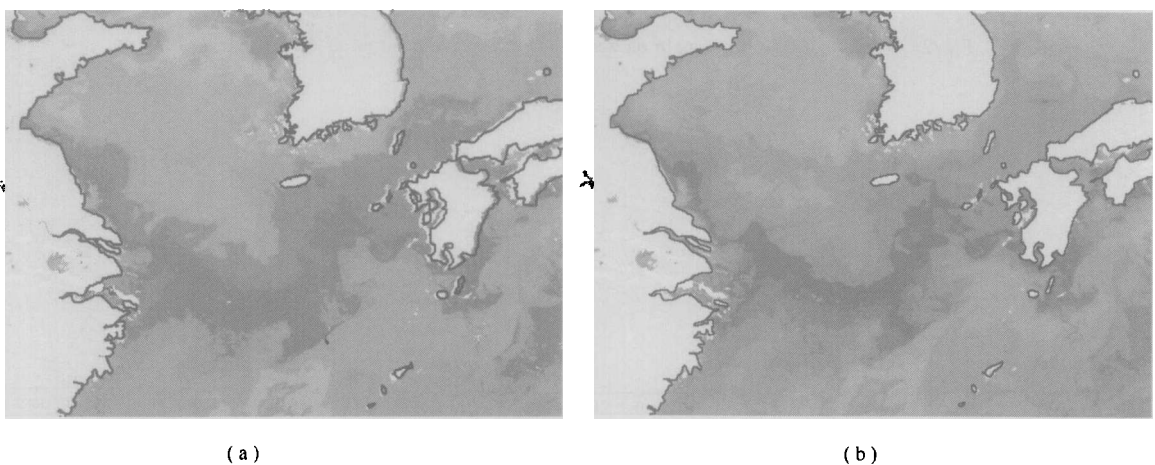


图 5 经平移校正和卫星姿态校正后 AVHRR SST 图像的比较

(a) 平移校正; (b) 姿态校正

Fig. 5 The comparison of AVHRR SST images after translation and attitude correction

a. translation correction; b. attitude correction

系与卫星轨道坐标系中的经纬度坐标, i 为卫星轨道倾角。忽略卫星偏航角、俯仰角对图像畸变的影响,并引入卫星星下点经纬度偏离 $\delta\lambda, \delta\phi$, 则有

$$\lambda_p' = \arcsin\left(\frac{\sin\Phi_s}{\sin i}\right)$$

(7)

$$\Phi_p' = \beta$$

(8)

$$\lambda_s = \lambda_{26} + \frac{(\lambda_{25} - \lambda_{26})\delta\beta}{\Delta\beta} + \delta\lambda$$

(9)

$$\Phi_s = \Phi_{26} + \frac{(\Phi_{25} - \Phi_{26})\delta\beta}{\Delta\beta} + \delta\phi$$

(10)

$$\delta\beta = \arcsin\left[\frac{R+h}{R}\sin\delta\alpha\right] - \delta\alpha$$

(11)

$$\Delta\beta = \left\{ \arcsin\left[\frac{R+h}{R}\sin(40\Delta\alpha - \delta\alpha)\right] - (40\Delta\alpha - \delta\alpha) \right\} + \left\{ \arcsin\left[\frac{R+h}{R}\sin(\delta\alpha)\right] - (\delta\alpha) \right\}$$

(12)

其中 $\lambda_{25}, \phi_{25}, \lambda_{26}, \phi_{26}$ 分别表示 AVHRR L1B 格式数据中给出的扫描行“51”点中的第 25, 26 点的经纬度(以下第 25, 26 点的经纬度均特指由 AVHRR L1B 格式数据中给出的), $\delta\beta, \Delta\beta$ 分别表示第 26 点与星

下点、第 25 点与第 26 点所对应的地心角(第 25, 26 点的扫描点序号分别为 985, 1025)。将(2), (4), (7), (8), (9), (10), (11), (12) 式代入 6(a), 6(b) 式, 可以得到含有扫描点在地心旋转坐标系与卫星轨道坐标系内坐标的 2 个方程(以下 6(a), 6(b) 式均特指这 2 个方程), 其中 $\delta\alpha, \delta\lambda, \delta\phi$ 为 3 个待定量。一旦 $\delta\alpha, \delta\lambda, \delta\phi$ 确定, 就可实现对图像的校正。

由图 5(a) 可见, 在平移校正过程中, 图像不同部分经纬度的偏移量差别不大, 另外, 考虑到卫星滚动对图像横向畸变的影响主要存在于扫描行两侧, 因此星下点经纬度的偏移量 $\delta\lambda, \delta\phi$ 可由星下点附近 GCPs/GCBs 的偏移量获取。将获取的 $\delta\lambda, \delta\phi$ 和 1 个 GCP/GCB 在地心旋转坐标系中的坐标值、GCP/GCB 所在扫描行“51 点”中的第 25, 26 点的经纬度和 GCP/GCB 对应的扫描点序号代入 6(a) 或 6(b) 式, 即可获取卫星滚动角 $\delta\alpha$ 。为此, 我们选取了 5 个 GCPs, $\delta\lambda, \delta\phi$ 取前两个 GCPs 的经纬度偏移量的平均值。对每个 GCPs, 分别由 6(a)、6(b) 式求出 $\delta\alpha$ 。计算结果以及其它相应数据如表 1。

表 1 求得的 $\delta\alpha$ 和相应的数据

Table 1 $\delta\alpha$ and corresponding data

GCPs 序号	在原始图像中经度	在原始图像中纬度	扫描点序号	扫描行第 26 点经度	扫描行第 26 点纬度	实际经度	实际纬度	经度偏移量	纬度偏移量	由 6(a) 式求得的 $\delta\alpha$	由 6(b) 式求得的 $\delta\alpha$
1	120.40	35.43	1132	121.34	35.59	120.31	36.06	0.09	-0.63	0.00682	0.01603
2	122.78	36.76	832	121.04	36.52	122.68	37.40	0.10	-0.64	0.00225	0.02595
3	124.72	37.45	627	120.91	36.94	124.68	38.11	0.04	-0.66	-0.00856	0.01055
4	126.18	37.12	504	121.08	36.40	126.16	37.74	0.02	-0.62	-0.00895	0.00401
5	129.19	33.43	351	122.27	32.50	129.20	34.08	-0.01	-0.65	-0.00917	-0.03388

由表 1 可见, 对于不同的 GCPs, 由 6(b) 式求得的 $\delta\alpha$ 差别很大; 当 GCPs 靠近星下点时, 由 6(a) 式求得的 $\delta\alpha$ 同样存在较大的差异。这些差异出现的原因主要是: 滚动角对图像畸变的影响主要存在于横向, 在 6(b) 式中, GCPs 的选取误差对纬度的影响远大于滚动角的影响; 由图 3 可见, 滚动角对图像横向畸变的影响主要存在于扫描行两侧, 当 GCPs 靠近星下点时, 在 6(a) 式中, GCPs 的选取误差对经度的影响超过了滚动角的影响。

考虑到以上因素, 我们采用如下步骤进行 $\delta\alpha, \delta\lambda, \delta\phi$ 的求解

(1) 选取 x_1 个靠近星下点轨迹的 GCPs/GCBs, 求出 x_1 个相应点经纬度的偏移量, 然后求平均得出星下点经纬度的偏移量 $\delta\lambda, \delta\phi$;

(2) 选取 x_2 个扫描点号小于 600 或大于 1400 的 GCPs/GCBs(由图 3 可见, 在扫描点序号为 600—1400 之间, 由卫星滚动所引起的图像横向畸变相对较小), 将它们的扫描行序号、它们在地心旋转坐标系中的坐标值和它们所在扫描行“51 点”中的第 25, 26 点的经纬度代入 6(a) 式, 解出 x_2 个卫星滚动角, 然后求平均得出 $\delta\alpha$ 。

在该实例中, 卫星星下点轨迹西斜纵贯山东半岛, 在星下点轨迹两侧, 我们各选取 1 个 GCPs 来获取 $\delta\lambda, \delta\phi$ (表 1 中 1, 2 号 GCPs), 在朝鲜半岛和对马岛各选取 1 个扫描点序号小于 600 的 GCPs(表 1 中 4, 5 号 GCPs), 由 6(a) 式获取 $\delta\alpha$, 利用 6(a), 6(b) 式对图像进行了卫星姿态校正, 校正结果如图 5(b) (其中图 5(a) 以 1K 为一个色阶, 图 5(b) 以 0.5K

为一个色阶),校正效果良好。

5 结 论

通过理论分析可知,卫星的姿态偏离可以使 AVHRR 图像产生畸变,其中卫星的滚动角使图像产生横向缩放,卫星的偏航角使图像产生纵向扭曲。实例分析表明,卫星姿态偏离对 AVHRR 图像畸变的影响主要是由卫星的滚动引起的,卫星的滚动角使图像产生横向比例畸变。

参 考 文 献 (References)

- [1] Kloster K. Using TBUS Orbital Elements for AVHRR Image Gridding[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1989, 10(4): 653—659.
- [2] John R, Brush H. A Method for Real-time Navigation of AVHRR Imagery[J]. *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sensing*, 1985, 23(5): 876—887.
- [3] John R, Brush H. The Navigation of AVHRR Imagery[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, 9(9): 1491—1502.
- [4] Moreno J F, Melia J. A Method for Accurate Geometric Correction of NOAA AVHRR HPRT Data[J]. *IEEE Trans. Geosc. & Remote Sensing*, 1993, 31(1): 204—226.
- [5] Krasnoposky V M, Breaker L C. The Problem of AVHRR Image Navigation Revisited[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15(6): 979—1008.
- [6] Marsouin A, Brunel P. Navigation of AVHRR Image Using AR-GOS or TBUS Bulletins[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1991, 12(10): 1575—1592.
- [7] Davison G J. Ground Control Pointing and Geometric Transformation of Satellite Imagery[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1986, 7(1): 65—74.
- [8] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O *et al.* Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN5[R]. AFGL-TR-80-0067, AD A088 215.
- [9] Katherine B, Kidwell. NOAA Polar Orbiter Data User's Guide[R]. November 1998, <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/cover.htm>.
- [10] Geoffrey Goodrum, Katherine B. Kidwell, *et al.* NOAA KLM User's Guide[R]. September 2000, <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/cover.htm>.
- [11] Wang G H, Chen B, He W P. Study of Latitudes and Longitudes of AVHRR 2048 Points Based on Transformation of Coordinates[J]. *Journal of Qingdao University*, 2003, 16(3): 45—48. [王光辉, 陈标, 何卫平. AVHRR 数据 2048 点经纬度获取研究[J]. 青岛大学学报, 2003, 16(3): 45—48.]

The Effects of Attitude Deviation on AVHRR Image Navigation

WANG Guang-hui, XU Shi-chang, CHEN Biao
(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: In remote sensing, it is necessary to correct the images for distortions due to Earth shape, Earth rotation, variations in satellite orbit and satellite attitude. In this paper, we analyze the effect of attitude deviation on the transverse proportion distortion and the portrait squirm distortion of AVHRR image, and point out that the rolling of satellite can bring image transverse proportion distortion just like the Earth shape's performance. We also develop a corresponding correction model.

Key words: AVHRR image; attitude deviation; transverse proportion distortion; GCPs/GCBs