

文章编号:1001-9014(2005)01-0019-04

45°镜系统扫描轨迹分析及其对像旋校正的影响

孙德新, 王建宇

(中科院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:分析了45°镜系统的扫描规律及其对像旋校正的影响. 给出了像旋图像的地面软件校正结果. 结果表明在充分考虑了地球曲率、探测器的离轴及探测器安装角度影响的情况下, 45°镜系统对地面无漏扫, 适当增加扫描角度, 扫描系统获取的总视场内的地面信息无丢失, 像旋对系统空间分辨率及图像的配准无影响, 像旋图像可以通过软件方法进行校正.

关键词:45°镜扫描系统; 扫描轨迹; 像旋; 软件校正; 空间分辨率

中图分类号:TP72; TP75 **文献标识码:**A

SCAN TRACK OF SYSTEM USING 45° MIRROR AND ITS EFFECT ON THE CORRECTION OF IMAGE ROTATION

SUN De-Xin, WANG Jian-Yu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: The scan law of system using 45° mirror and its effect on correction of Image rotation was analyzed. The result of the correction of image rotation by software on ground was illustrated. After concerning the radius of the earth and the off-axial and mounting angel of the detector, it turns out that the system can acquire thorough ground information when increasing scanning angle, and the image rotation does not influence the space resolution and the band match of the system, and image rotation can be corrected by software.

Key words: scan system with 45° mirror; scan track; image rotation; software correction; space resolution

引言

在光机扫描方式中, 45°镜扫描具有结构简单、易控制、体积小、便于星上辐射校正等诸多优点, 因此在星载光机扫描成像仪中特别是体积重量要求严格的小卫星有效载荷中, 采用45°镜扫描是理想的扫描方式. 但45°镜在扫描过程中会产生像面旋转现象, 如不采取措施而直接采用该扫描方式会造成轴外视场随扫描角的变化而旋转, 从而无法配准视场. 所以采用45°镜扫描的方式就限制了多元线列或面阵探测器在仪器中的使用, 从而使得系统的探测灵敏度无法通过采用多元探测器的方法来获得提高.

软件校正像旋方法与光机消旋方式相比, 具有无需在光路中插入任何光学元件、可靠性高、对系统体积重量影响小、实现容易等优点. 在扫描过程中, 系统的瞬时视场是不变的, 因此探测器像元接收到

的辐射量不会产生影响, 只会对系统的地面分辨率产生影响. 要对图像进行良好的校正, 需要建立像旋图像与正常图像之间的关系, 而这种关系通常是由扫描系统的扫描轨迹决定的, 因此对45°镜加多元探测器的地面扫描轨迹做必要的分析非常有意义.

1 45°镜加多元探测器的系统扫描轨迹的理论分析

根据光学系统成像规律及空间坐标关系, 可得45°镜扫描系统在地面的扫描轨迹为:

$$B_y = H^* \Delta\phi^* (j + i^* \tan\theta / \cos\theta) - H^* \tan\theta \quad (1)$$

$$B_x \cong H^* \Delta\phi^* (j^* \sin\theta - i) \quad (2)$$

公式(1), (2)的具体推导请见参考文献1第41-43页, 其中 $\Delta\phi$ 为系统瞬时视场角, i 为距离光轴等效瞬时视场数, $i = 0, 1, \dots, (N-1)/2$ (N 为探测器

收稿日期: 2004-04-25, 修回日期: 2004-10-10

基金项目: 环境一号B星基金资助项目(HJY30-1-B)

作者简介: 孙德新(1972-), 男, 山东泰安人, 助研, 博士, 主要从事航天光电遥感技术研究.

Received date: 2004-04-25, revised date: 2004-10-10

总单元数), j 为不同探测器距离光轴的等效瞬时视场列数, $j=0, 1, \dots$

式(1)、(2)表示了 45° 镜在忽略了飞行器运动、地形起伏及地球表面弯曲带来的影响下扫过地面的轨迹坐标, 当列阵探测器不放在主光轴上时, 系统扫描在沿轨和穿轨方向都有畸变, 45° 镜的扫描轨迹在沿轨方向存在着畸变由离轴引起, 畸变的大小与探测器的离轴距离及扫描的角度有关, 大小表示为 $\Delta x = H^* \Delta \phi^* j^* \sin \theta$, 同时离轴和像旋的共同作用, 穿轨方向的总畸变大小为 $\Delta y = H^* \Delta \phi^* (j + i^* \tan \theta / \cos \theta)$, 由于离轴产生的扫描轨迹在 y 方向的位移大小为 $H^* \Delta \phi^* j$, 反映到图像上为 j 个像元, 像旋作用产生的影响为在 y 方向产生大小为 $H^* \Delta \phi^* i^* \tan \theta / \cos \theta$ 的位移, 位移大小与扫描角度正切与余弦之商及探测器像元与光轴的距离成正比; 探测器放在光轴上时离轴影响不存在, 扫描轨迹在沿轨方向畸变为 0, 在 y 方向上的位移仅与扫描角度和探测器像元与光轴的距离有关。

2 45° 镜加多元探测器扫描对像旋校正的影响

2.1 对系统地面分辨率的影响

根据前面的分析, 对于星下点来说, 探测器对地面的采样与其它线扫描方式没有差别, 而对于非星下点的光轴上的探测器来说, 由于旋转, x 轴正向的探测器是过采样的, 而负向的探测器对地面是欠采样的, 这必然对整个系统的空间分辨率造成一定的影响. 主要影响表现为: 1) 对地面过采样的探测器实际的扫描角度无法达到要求的扫描角度, 即系统的刈幅宽度无法满足规定的宽度. 以环境红外相机为例, 系统采用 20 元并扫, 扫描角度应当达到 $\pm 29^\circ$ 对应刈幅宽度 720km, 而实际上过采样探测器扫过的地球宽度为 718.1km 对应扫描角度 $\pm 28.9^\circ$, 因此实际进行校正时应考虑该问题的影响, 为了不丢失地球信息, 实际采样时应扩大扫描范围, 为使过采样探测器扫描范围达到为系统的扫描角度 $\pm 29^\circ$. 系统的实际扫描角度应为 $\pm 29.1^\circ$. 2) 负向探测器对地面的欠采样必然会降低系统的地面采样率, 可能会对地面分辨率产生影响, 以红外相机为例, 采用 45° 镜 20 元并扫时, 扫描角速度为 14.33rad/s, 在总视场边缘, 边缘探测器的地面扫描速度仅增大了 3.9Km/s, 为正常扫描速率的 0.03%, 同时单像元对应的地面尺度将变为 176.4m, 正常扫描情况下为 175.7m, 比正常情况下的仅增大了 0.3%. 因此 45° 镜扫描和其它扫描方式相比地面扫描速度和地面采

样间隔并没有太大的变化, 可以认为对系统的地面分辨率不会产生影响.

2.2 系统对地面有无漏扫现象

对于放在不同光学位置处的探测器, 获得的扫描轨迹是不同的, 因此应分别进行讨论. 探测器放在光轴上时, 由于在沿轨方向不存在畸变, 因此置于光轴上的探测器的扫描轨迹为上宽下窄的梯形, 在沿轨方向, 相邻两轨图像为无缝连接, 由于穿轨方向的畸变, 在沿轨方向位置相同的地物, 传感器对其的采样间隔不同, 导致图像在几何位置上产生畸变. 在相邻两轨图像的连接处图像的畸变表现的最为明显. 因此对于地面的扫描, 探测器放在光轴上时是不存在漏扫的, 在不采取任何措施的情况下, 45° 镜加多元探测器扫描获取了地物的所有光谱辐射信息, 采集所获得的畸变图像, 辐射信息并没有丢失, 只是图像几何位置产生了变化. 根据式(1)、(2)得到的结论, 探测器不在光轴上时, 扫描轨迹随着扫描角度的变化在沿轨方向产生大小为 $\Delta x = H^* \Delta j^* j^* \sin \theta$ 的位移, 反映到图像上, 一轨图像在穿轨方向的边缘表现为正旋曲线, 探测器离光轴越远, 这种作用表现的越为明显, 同样与在光轴上相似, 扫描轨迹在穿轨方向也存在着畸变, 畸变大小表示为 $\Delta y = H^* \Delta \phi^* (j + i^* \tan \theta / \cos \theta)$, 位移 $H^* \Delta \phi^* j$ 是由于离轴产生的影响, 即使不存在像旋现象该位移也是存在的, 其大小反映到图像上为 j 个像元, 通常情况下在多光谱扫描仪中, 置于不同位置处的探测器往往被用于探测不同的波段, 该位移反映了不同波段图像间的不同, 在波段配准处理时被消除掉. 另外与置于光轴上的探测器相同, 扫描轨迹在穿轨方向还产生大小为 $H^* \Delta \phi^* i^* \tan \theta / \cos \theta$ 的位移, 这是像旋产生的原因所在, 因此在排除了由于探测器位置对图像的影响之后, 处于不同位置的探测器的扫描轨迹在穿轨方向的畸变是相同的, 遵循着同样的规律, 在后面的处理中可依据同样的位置关系进行处理.

根据式(1)、(2), 尽管单个扫描条带的上下两个边缘的实际扫描范围是不同的, 在相同的扫描范围之内, 条带的边缘扫描轨迹是相同的, 都表现为正弦曲线, 在局部, 由于象元的形状是方形的, 因此象元的边缘在理论上对条带的边缘有一定影响, 但这种影响是极小, 计算的结果为边缘效应引入的扫描误差小于 0.001%, 因此即使探测器不放在光轴上, 在不采取任何措施的情况下, 45° 镜加多元探测器扫描同样获取了地物的所有光谱辐射信息, 采集所获得的畸变图像, 辐射信息并没有丢失, 只是图像几何

位置产生了变化.对瞬时视场为 0.23mrad,扫描角度为 $\pm 30^\circ$,轨道高度 650km,探测器离光轴 4 个瞬时视场,探测器上象元离光轴分别为 10,0,-10 时 45°镜扫过地面的相邻两条带的轨迹图的计算的结果表明在地面扫过的两条带之间在沿轨方向的差别极小约为 1.2m,该差别来源于穿轨方向的错位,穿轨方向像元的错位最大距离为 2000m,该错位的产生是探测器的离轴和 45°镜扫描像旋的综合结果,错位现象产生的直接后果是使系统采集到的地面信息在扫描的一个方向扫描角度小于系统的总视场的一半,而扫描的另一个方向扫描角度则大于系统的总视场的一半.错位引起的沿轨方向的两条带的差别远小于系统的地面采样间隔,因此可以认为不存在漏扫现象.错位可以通过增大扫描角度的方法来消除其对系统总视场的影响.

2.3 地球曲率及探测器安装角度的影响

由于地球曲率的存在,卫星航高将随着扫描的角度的增大而增大,在相同的扫描角度下,由于航高的增大传感器的刈幅宽度将变大,但由于在相同的角度下,在穿轨方向上,航高的增大程度是相同的,在沿轨方向上由于扫描条带宽度极小(相对于地球半径)因此地球曲率的存在将对两扫描条带的连接不会产生影响,它所带来的影响仅仅存在于两个方面:一是使扫描的刈幅宽度变大,在考虑了地球影响之后红外相机刈幅宽度将由 720km 变为 731.6km,另一个是使得扫描条带的边缘宽度比中间宽度变大.对于红外相机,未考虑地球曲率半径影响时,扫描条带边缘视场的条带宽度与中心视场的条带宽度相同.考虑了地球曲率半径($R = 6378\text{K}\text{m}$)后,扫描条带边缘视场的条带宽度与中心视场的条带宽度相差 28m,瞬时视场对应的星下点的地面距离为 150m,因此两者的误差表现在图像上大约为 0.187 个象元大小.

探测器安装位置与竖直方向的夹角误差对扫描轨迹的影响表现在扫描轨迹在沿轨和穿轨方向的误差,但该夹角在光校时的误差完全可以小于 1/3 瞬时视场,计算表明在瞬时视场为 0.23mrad,扫描角度为 $\pm 29^\circ$,轨道高度 650km,探测器离光轴 4 个瞬时视场,探测器安装位置与竖直方向安装误差为 1 个瞬时视场时相邻两个扫描条带边缘邻接在边缘视场处该误差仅有 $8.038 \times 10^{-5}\text{m}$,因此可以认为系统不存在漏扫现象.

2.4 对图像配准的影响

对于采用摆镜、双面镜、整体旋转扫描等扫描方

式的遥感器来说,由于在扫描过程中,不存在像面的旋转问题,不同波段间图像的配准是简单的.对于采用 45°镜扫描的系统来说,对该问题还需作进一步的讨论.(a)当不同波段的探测器都放在光轴上时,尽管 45°镜扫描使扫描轨迹产生变形,但系统会在同一时间对同一地物目标的不同波段的信息进行采样,因此不同波段的图像不存在谱段的配准问题.(b)当不同波段的探测器放在主光学系统的焦面的不同位置处时,探测器与光轴的相对位置决定了扫描时探测器的采样轨迹,对应于同一一次的扫描,不同波段的探测器在地面的采样轨迹不同,轨迹的差别取决于探测器的摆放位置及与光轴的距离.相对于光轴距离最大的两个相反位置处的探测器在地面的扫描轨迹差别最大.在瞬时视场为 0.23mrad,扫描角度为 $\pm 29^\circ$,轨道高度 650km,探测器离光轴 ± 10 个瞬时视场时,两个波段探测器在地面的采样轨迹对于一次扫描,不同探测器的扫描轨迹是很不相同的,与主光轴对称放置的探测器地面扫描轨迹的最大距离可以达到 5 个瞬时视场的地面对应距离.但多次扫描之后,不同探测器扫描的轨迹是重叠的,因单凭一次的扫描很难实现图像的波段的配准,考虑到遥感图像是由多个条带组成的,因此在所获得全部图像数据除了前后几个条带所采集的地物区域外,在其他扫描区域内,区域地物的波谱信息均被各探测器所接收,同一地物目标的不同波段信息被不同的探测器在不同的时间接收.与不存在像旋的系统相比,由于同一地物目标的不同波段信息被不同探测器在不同的扫描带中接收,因此 45°镜加多元探测器的系统的波段配准将复杂的多,但由于地物目标信息没有漏掉,像旋图像与非像旋图像的位置关系是确定的,因此只要像旋是可以校正的,波段配准也是可以实现的.

3 像旋软件校正试验结果

为了验证以上分析的正确性,取海洋水色扫描仪的地面获取的图像进行了地面校正试验,结果如下:

图 1 是把 K 镜固定时地面扫描获取的图像,图 2 是其部分放大图像,可以看出图像边缘处扫描条带产生旋转有明显的像旋现象,图 3 是通过软件校正后获得的图像,图 4 是其部分放大图像,从图中可以看出,图像边缘处扫描条带产生的旋转已被校正,由于像旋产生的扫描条带之间的锯齿现象已经消除,图像细节丰富、边缘清晰已达到了校正的目的.



图1 原始图像
Fig.1 Original image



图2 原始图像的局部放大图像
Fig.2 Original image's magnified part



图3 软件校正图像
Fig.3 Image corrected by software



图4 软件校正图像的局部放大图像
Fig.4 Image's magnified part corrected by software

考虑了地球曲率,探测器的离轴及探测器安装角度的影响,并在此基础上分析了像旋对图像配准的影响,结论如下:

- 1) 即使考虑了地球曲率,探测器的离轴及探测器安装角度的影响,仍然可以认为 45° 镜加多元线列探测器的系统对地面的扫描不存在漏扫现象. 通过适当增加扫描角度,可以保证扫描系统获取的总视场内的地面信息无丢失,只是图像的几何特征发生畸变,这是对像旋图像实施校正的条件之一.
- 2) 图像的畸变造成不同波段图像配准处理更加困难,但图像仍然是可以配准的.
- 3) 45° 镜加多元线列探测器的系统,扫描系统对系统地面分辨率的影响很小可以忽略.
- 4) 图像校正试验的结果表明,像旋图像可以通过软件方法进行校正,同时也证明了以上分析的正确性.

REFERENCES

- [1] SUN De-Xin. System Design of IR Camera based on 45° scanning mirror[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of China Academy of Science. 2003.
- [2] HAN Xin-Zhi. Spaceborne Multispectral Remote Sensing [M]. Beijing: Yu Hang Press, 1991 (韩心志. 航天多光谱遥感. 北京: 宇航出版社), 1991.
- [3] Zhang E. System Design of IR Camera based on 45° scanning mirror[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Science. 1998.
- [4] Philip N. Slater Remote Sensing: Optics and Optical Systems [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company. 1980.

4 结语

本文在分析 45° 镜扫描轨迹的基础上,充分考