

文章编号: 1672-8785(2015)02-0025-05

45° 旋转扫描镜多元并扫的红外图像校正建模与仿真研究

马文佳¹ 汪少林¹ 于 淼¹ 柴金广²

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 200240 ;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 对某遥感卫星红外扫描成像仪 45° 旋转扫描镜多元并扫成像中产生的图像像旋现象进行了分析, 构建了图像校正模型。阐述了像旋产生的机理及图像校正方法。通过对遥感图像的仿真分析, 初步验证了地面软件消像旋方案的正确性与可行性。

关键词: 红外扫描成像仪; 45° 旋转扫描镜; 多元并扫; 像旋; 图像校正

中图分类号: V414 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.02.005

Modeling and Simulation of Infrared-image Correction of 45° Multi-parallel Rotary Scanning Mirror

MA Wen-jia¹, WANG Shao-lin¹, YU Miao¹, CHAI Jin-guang²

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The image rotation generated in the multi-parallel scanning process of a 45 degree rotary scanning mirror of a spaceborne infrared scanning imager is analyzed. A model for image correction is constructed. The generation mechanism of image rotation and image correction methods are described. Through the simulation analysis of remote sensing images, the validity and feasibility of the scheme to use a ground software to eliminate image rotation are verified preliminarily.

Key words: infrared scanning imager; 45 degree rotary scanning mirror; multi-parallel scanning; image rotation; image correction

0 引言

扫描成像仪是航天遥感器的重要组成部分。这类仪器不仅能获取目标的光谱辐射信息, 还可以获取目标的几何图像信息。在各类扫描成像仪中, 扫描系统是其主要组成部分, 通过它可以对目标进行扫描成像。为了提高遥感仪器的探测灵敏度, 人们通常会在扫描成像仪中增加系统的光学口径或使用多元探测器并扫方

式。但前者会受到系统总体积的制约, 所以多元探测器并扫的方式成为目前提高系统探测灵敏度的主要手段^[1]。

45° 旋转扫描镜具有扫描机构尺寸小、系统稳定性高、可覆盖宽度大以及能将深冷空作为辐射定标基准等优点, 被广泛用于天基对地遥感成像^[2]。但是, 45° 旋转扫描镜会产生图像反射旋转即像旋现象, 在用于多元探测器并扫体制成像时会产生光轴外视场失配现象。目前, 机

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 马文佳 (1986-), 男, 浙江东阳人, 工程师, 主要从事卫星光学载荷总体设计研究。

E-mail: xgdmawenjia@163.com

械消像旋手段(如道威棱镜和 K 镜系统)可以很好地消除 45° 旋转扫描产生的像旋,但是道威棱镜受光学材料的限制,只适用于可见光到近红外($0.38\ \mu\text{m} \sim 1.1\ \mu\text{m}$)波段,而 K 镜系统则因光学系统加长、机构规模增大、在小瞬时视场下光路配准难等问题,不适用于航天遥感领域。因此,通过地面软件方式校正 45° 旋转扫描镜产生的图像旋转畸变问题逐渐成为研究的热点^[3]。

本文对 45° 旋转扫描镜的像旋产生机理进行分析,并找出地面图像校正的有效方法。通过对遥感图像的仿真分析验证本文方法的正确性。

1 图像畸变机理分析

以某遥感卫星装载的红外扫描成像仪为例,采用 45° 旋转扫描镜三元并扫的成像方式分析图像畸变机理。探测器、旋转扫描镜和地面印迹的几何关系如图 1 所示。

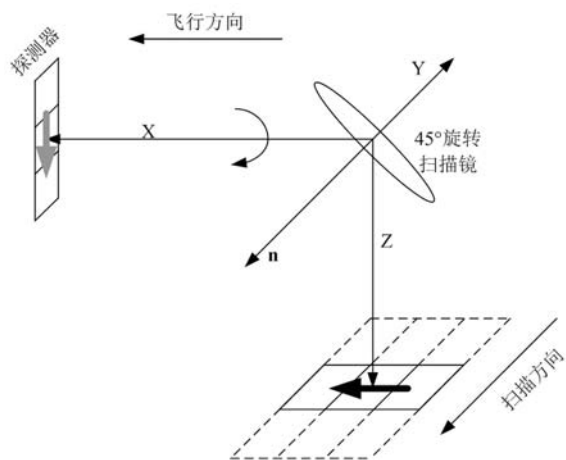


图 1 45° 旋转扫描镜成像示意图

如图 1 所示,建立三维直角坐标系 XYZ,其中 X 轴方向为卫星飞行方向, Y 方向垂直于纸面向内, Z 轴垂直向下。 45° 镜与 X 轴成 45° 角,当 45° 镜指向星下点时,镜面法向矢量 $\vec{n}$ 为

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 \\ 0 \\ \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} = \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

当 45° 镜绕 X 轴向 -Y 方向转动 θ 角时,镜

面法向矢量变为

$$\begin{aligned} \vec{n}_0 = Q\vec{n} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 \\ 0 \\ \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 \\ -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

对法线单位向量为 $\vec{n}$ 的平面镜,入射向量 $\vec{B}$ 与反射向量 $\vec{A}$ 的关系为 $\vec{A} = \vec{B} - 2\vec{n}(\vec{n} \cdot \vec{B})$ 。则当 45° 镜绕 X 轴向 -Y 方向转动 θ 角时,有

$$\vec{A} = \vec{B} - 2\sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 \\ -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \left(\sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 \\ -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \vec{B} \right) \quad (3)$$

假设 $\vec{B} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}$, 则上式可表示为

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} - 2 \times \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 \\ -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \\ &\quad \left(\sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 \\ -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

得

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \begin{bmatrix} \sin\theta b_y - \cos\theta b_z \\ \sin\theta b_x + \cos^2\theta b_y + \sin\theta \cos\theta b_z \\ -\cos\theta b_x + \sin\theta \cos\theta b_y + \sin^2\theta b_z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \sin\theta & -\cos\theta \\ \sin\theta & \cos^2\theta & \sin\theta \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

即

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 0 & \sin\theta & -\cos\theta \\ \sin\theta & \cos^2\theta & \sin\theta \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \vec{B} \quad (6)$$

可得平面镜的反射作用矩阵 $R(B)$ 为

$$R(B) = \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ \sin \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此, $\vec{A}$ 与 $\vec{B}$ 之间的关系可以表示为 $\vec{A} = R(B)\vec{B}$ 。即

$$\begin{aligned} \vec{B} &= (R(B))^{-1} \vec{A} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ \sin \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \vec{A} \quad (8) \end{aligned}$$

所以可得到探测器上的像移 $A(x, y, z)$ 与地面扫描轨迹 $B(x, y, z)$ 之间的关系为

$$\vec{B} = H\omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ \sin \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \vec{A} \quad (9)$$

2 图像校正模型建立

图像像旋校正的实质就是对输入图像进行重采样, 下面对两种情形分别进行研究。

(1) 探测器在光轴上

如图 2 所示, 探测器 1 在光轴上, i 取值为 0、 ± 1 , j 取值为 0。

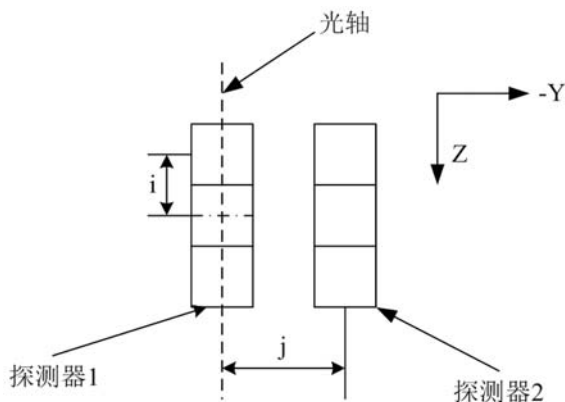


图 2 光轴上的探测器

(2) 探测器偏离光轴

如图 2 所示, 探测器 2 偏离光轴, 此情形下, i 取值为 0、 ± 1 , j 根据实际设计取值。

针对上述两种情形, 采用不同的插值方式对输入图像进行重采样, 获得校正后的图像。

对于情形 (1), X 轴上的坐标不变, Y 轴坐标发生像旋变化。因此, 主要根据 Y 轴方向两点邻域内的某点进行插值运算即可, 如图 3 所示。

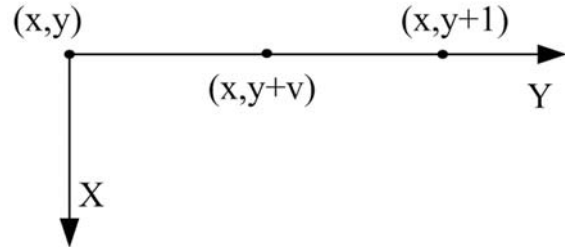


图 3 两点插值示意图

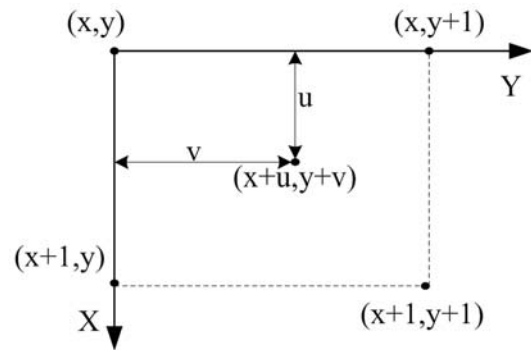


图 4 四点插值示意图

图 3 中, $\nu \in (0, 1)$ 。根据两点插值可得 $(x, y + \nu)$ 处的灰度值:

$$P(x, y + \nu) = P(x, y) \times (1 - \nu) + P(x, y + 1) \times \nu \quad (10)$$

对于情形 (2), X 轴和 Y 轴上都有像旋变化, 因此, 需要进行四点插值, 如图 4 所示。

图 4 中, $u, \nu \in (0, 1)$ 。根据四点插值可得 $(x + u, y + \nu)$ 处的灰度值:

$$\begin{aligned} P(x + u, y + \nu) &= (1 - u)(1 - \nu)P(x, y) + (1 - u)\nu P(x, y + 1) \\ &\quad + u(1 - \nu)P(x + 1, y) + u\nu P(x + 1, y + 1) \quad (11) \end{aligned}$$

根据上述校正方法, 理论上可以将像旋图像校正成正常图像。

3 仿真与分析

在某遥感卫星红外扫描成像仪的方案设计中,我们采用 45° 旋转扫描镜和三元并扫方式对地进行成像,其中包括两个红外通道(CH1 和 CH2)。焦面上探测器的视场配准如图 5 所示。

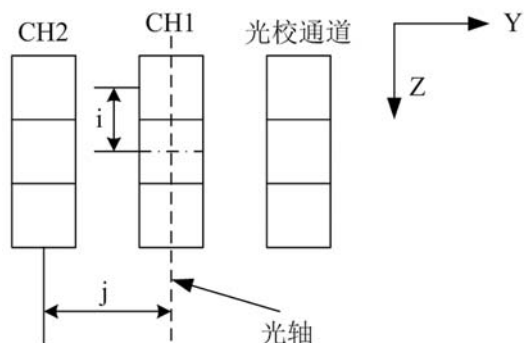


图 5 某遥感卫星红外扫描成像仪探测器的几何位置示意图

从上图可知, $i=0, \pm 1$, $j=0, -3$ 。假设卫星的轨道高度为 786 km, 像元的视场角为 0.64 mrad, 扫描范围为 $-57.6^\circ \sim 57.6^\circ$ 。由于仿真时得不到在轨实际像旋图像, 为了验证本文中像旋校正方法的正确性, 本文采用逆向处理方式和逆算法以正常图像生成像旋图像, 仿真结果如图 6 所示。



(b) 通道 1 的像旋图像, 其中扫描角 $\theta \in (-56.7^\circ, -42.2^\circ)$



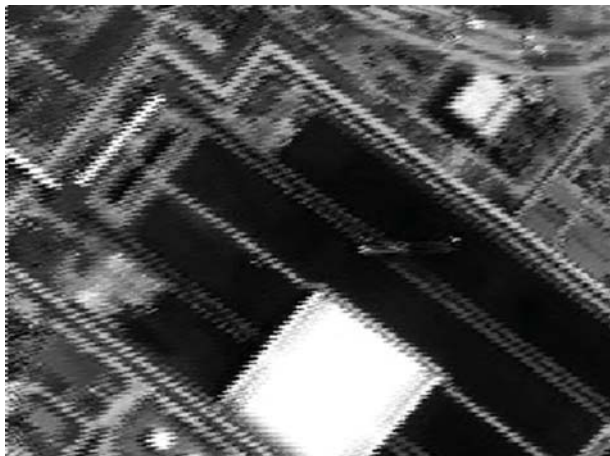
(c) 通道 2 的像旋图像, 其中扫描角 $\theta \in (-14.53^\circ, 14.53^\circ)$



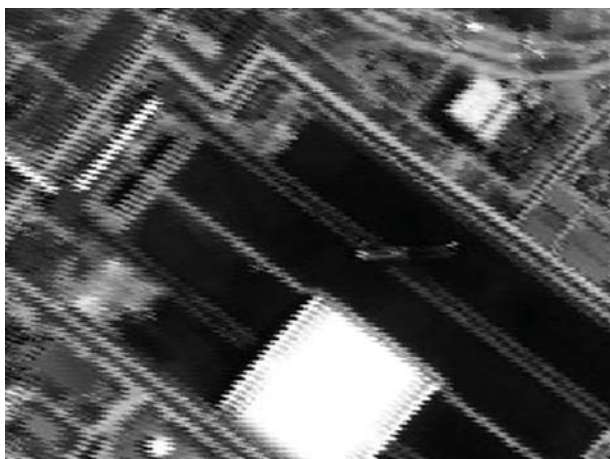
(a) 原始图像



(d) 通道 2 的像旋图像, 其中扫描角 $\theta \in (56.7^\circ, 42.2^\circ)$



(e) 通道 1 的像旋图像, 其中扫描角 $\theta \in (-56.7^\circ, -42.2^\circ)$ 局部放大图



(f) 通道 2 的像旋图像, 其中扫描角 $\theta \in (56.7^\circ, 42.2^\circ)$ 局部放大图

图 6 45° 旋转扫描镜三元并扫后成像效果图

由上述仿真分析可知, 图像像旋畸变程度与 45° 旋转扫描镜的成像扫描角度有关。成像扫描角度越大, 像旋畸变就越严重。探测器通道与

光轴重合时图像旋转的畸变程度小于偏离光轴通道时图像的畸变程度, 且偏离光轴越大, 图像像旋畸变越严重。由等效可逆变换可知, 本文提出的像旋校正方法正确, 地面软件消像旋的技术途径合理可行。

4 结论

通过对 45° 旋转扫描镜多元并扫图像畸变机理的分析, 建立了像元与地面轨迹之间的对应关系, 得出影响图像旋转畸变的主要因素及其影响程度。为降低图像旋转畸变, 在设计扫描系统时线列像元不宜太多, 同时像元探测器偏离光轴也不宜过大。通过仿真分析可知, 本文的像旋校正方法合理正确, 地面软件消像旋方案可行, 可作为红外扫描成像仪设计的理论依据。

参考文献

- [1] 孙德新. 45° 旋转反射镜像旋转的软件实时校正技术研究 [J]. 红外, 2002, 23(4): 10-13.
- [2] 刘素美, 马红章. 45° 旋转扫描镜多元并扫的图像畸变及软件校正 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 526-529.
- [3] 刘银年. 45° 镜多元探测器并扫成像特性和扫描轨迹分析 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 110-115.
- [4] 张幼文. 红外光学工程 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [5] Han X Z. The Discuss on the Scan Character of the 45° Rotating Scanning Mirror [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1991, 10(3): 233-236.
- [6] Wang M X. The Study of NOAA AVHRR Image Resampling and Projection Methods [J]. China Journal of Image and Graphics, 1997, 2 (1): 38-42.

新闻动态 News

美国 Ball Aerospace 公司拉开 JPSS-1 气象卫星的有效载荷安装序幕

据 www.ballaerospace.com 网站报道, 作为美国下一颗极轨气象卫星——JPSS-1 卫星上搭载的两个有效载荷, 臭氧绘图与剖面天底探

测组件 (OMPS-N) 以及云与地球辐射能量系统 (CERES) 仪器已被 Ball Aerospace 公司安装到卫星平台上。另外三个有效载荷——可见光红外辐射计组合仪 (VIIRS)、穿轨迹红外探测仪 (CrIS) 和先进技术微波探测仪 (ATMS) 的安装工作也将于今年陆续完成。

JPSS-1 卫星和 JPSS-2 卫星分别计划于 2017 年年初和 2021 年年底发射升空。

□ 岳桢千