

交错排列线列探测器对地成像几何特性及错位校正

王 运^{1,2} 孙胜利^{1,2} 林长青^{1,2}

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
² 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要 空间相机采用交错排列线列探测器对地成像,其奇、偶列图像数据在沿轨方向出现明显的错位变形,为保证图像的几何精度,提出了一种错位校正方法。通过坐标变换法建立了空间相机对地几何成像模型,分析了错位产生的原因。并对交错排列线列探测器对地成像特性,以及沿轨方向、和线列方向的错位位移情况进行了分析。利用蒙特卡洛法分析了轨道、姿态扰动以及目标高程等因素对错位变形的影响,根据其错位变形情况,提出了一种基于光流场的错位校正方法,利用奇、偶列图像的图像块匹配结果生成图像的光流场,通过光流场来实现图像的错位校正。将该方法用于某红外相机遥感图像的错位校正处理,能显著去除掉遥感图像的错位变形,验证了错位变形分析方法以及错位校正方法的有效性。

关键词 遥感;图像处理;错位校正;线列探测器;光流场

中图分类号 TP751.1; V447+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s110003

Earth Imaging Geometric Characteristics and Stagger Correction of Staggered Linear Array

Wang Yun^{1,2} Sun Shengli^{1,2} Lin Changqing^{1,2}

(¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China
² Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Space camera uses the staggered linear array for earth imaging, notable stagger distortion is presented between the odd and even parts of the image data in along track direction, in order to ensure the geometric accuracy of the remote images, a stagger correction method is proposed. The earth imaging geometrical model of the space camera is established by utilizing coordinate transformation, and the reason that leads to stagger distortion is discussed. The earth imaging characteristics of the staggered linear array is analyzed. The stagger value in along track direction and along the direction of the linear array is calculated, and the influences on stagger value introduced by orbital displacement, attitude fluctuations, and terrain topography are analyzed based on Monto-Carlo method. A stagger correction method based on optical flow field is proposed according to the characteristics of the stagger distortion, the optical flow field is generated by the block matching of the odd and even parts of the image, and the image is corrected by the calculated optical flow field. The method is used for stagger correction of an infrared camera, remarkable result is reached, which verifies the validity of the stagger distortion analysis method and the stagger correction method.

Key words remote sensing; image processing; stagger correction; linear array detector; optical flow field

OCIS codes 100.2000; 280.4788; 040.5160; 110.2960

1 引 言

在空间遥感领域发挥着重要的作用。空间相机对地线列探测器是空间遥感相机的核心器件之一,推扫成像常用的线列探测器按照排列结构可以分为

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-17

基金项目: 武器装备预研基金(9140A21041210ZK0702)

作者简介: 王 运(1984—),男,博士,主要从事遥感成像仿真分析、遥感图像处理等方面的研究。

E-mail: qinghyun2007@163.com

两种:1)所有像元顺序排列成一行,对地成像时能同时获得地面一行景物的图像数据,如资源三号测绘卫星三线阵相机^[1],其前、后视相机焦平面均由多片4096像元的线列探测器拼接而成;2)奇偶像元交错排列成两行,即所有奇像元排成一行,所有偶像元排成一行,奇、偶像元在沿轨线列方向的投影形成完整线列,奇、偶两行像元之间沿轨方向上分开一定距离,依靠卫星的运动完成整景图像数据的采集,如美国EO1搭载的先进陆地成像仪(ALI)^[2],其全色波段单片线列探测器由960个像元交错排列而成。

奇偶像元交错排列而成的线列探测器在对地推扫过程中并不能同时获得地面一行景物的图像数据,而是地面两行间隔采样的图像数据,因此采集到的原始图像数据在沿轨方向上呈明显锯齿状错位变形,严重影响了图像的几何性能。文献[3-4]利用现场可编程门阵列(FPGA)实现了一种红外长线列探测器位置错位实时校正方法,但该方法只能对整数像元错位进行校正,不适用于较复杂的错位变形情况。实际上,由于奇偶像元分时对地面一行景物成像,在此期间由于卫星姿轨扰动等因素的影响,其错位值将发生改变,并非固定值。文献[5]提出利用几何校正的方法来实现印度IRS-1C自扫描相机(LISS-4)奇偶像元的错位校正,利用相机严格几何成像模型以及重采样技术将奇偶像元图像投影至统一校正图像坐标系实现错位校正,其错位校正精度对相机几何成像模型的精度、卫星姿轨数据的采样频率及采样精度要求很高,这一需求往往很难实现。本文从交错排列线列探测器对地成像几何特性着手,根据线列探测器奇偶像元对地成像时复杂的错位变形情况,提出了一种基于奇数列、偶数列图像运动光流场的图像错位校正方法。

2 交错排列线列探测器对地成像特性分析

某红外相机在轨道高度为791 km、轨道倾角为98.5°的太阳同步圆轨道上对地推扫成像,相机无偏流角校正措施。相机焦平面由4片线列探测器交错拼接而成,每一片线列探测器像元数为512 pixel,由256对奇偶像元交错排列而成,像元大小为 $a_{\text{pixel}} = 28 \mu\text{m}$,像元间距为一个像元,奇偶像元沿沿轨方向分开52 μm ,约为1.86 pixel,交错排列线列探测器像元排列如图1所示。

图2为相机对地成像所摄原始图像,在相机沿

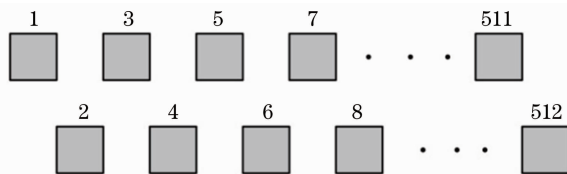


图1 交错排列线列探测器结构图

Fig. 1 Staggered linear array configuration

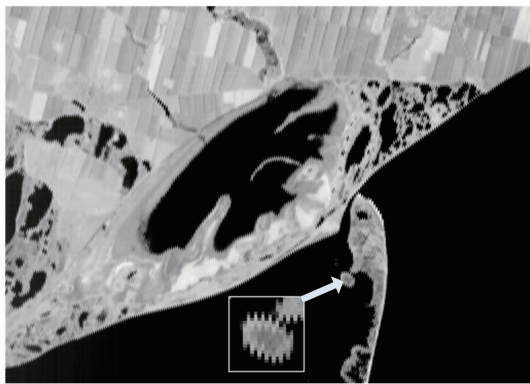


图2 未经错位校正的原始图像

Fig. 2 Raw image without stagger correction

轨方向可以明显看到图像各列呈锯齿状错位,尤其在对比度比较强烈的海岸线上该现象更加显著,从局部放大图可以看到奇偶像元所摄地物在相机沿轨方向上大约错位2 pixel。图像列的错位已严重影响了图像的可视化以及后续的几何定位处理,必须进行错位校正。为了更好地对图像进行错位校正,需要了解线列探测器奇偶像元对地成像时的几何特性,依据该几何特性来对图像进行错位校正。奇偶像元对地成像几何特性可以通过相机对地几何成像模型进行分析,相机对地几何成像模型依据文献[6-8]建立。

2.1 对地几何成像模型

相机对地几何成像模型是分析奇偶像元交错排列对地成像几何特性的基础,通过一系列坐标系间的相互转换,建立目标与像点之间的一一对应关系^[6]。如图3所示,在地心旋转坐标系内,已知焦平面上像点 (x, y) 的视向量 \mathbf{u}_E 和卫星位置 \mathbf{S} ,由共线方程便可以计算出像点对应目标 L 的地理坐标 (X, Y, Z) 。

$$\begin{cases} X = \mathbf{S}_x + \mu \times (\mathbf{u}_E)_x \\ Y = \mathbf{S}_y + \mu \times (\mathbf{u}_E)_y \\ Z = \mathbf{S}_z + \mu \times (\mathbf{u}_E)_z \end{cases} \quad (1)$$

式中 μ 为卫星到目标 L 的距离,视向量 \mathbf{u}_E 和卫星位置 \mathbf{S} 可以通过一系列坐标变换计算得到。图4给出了5个主要坐标系之间的相互转换关系,5个坐标系

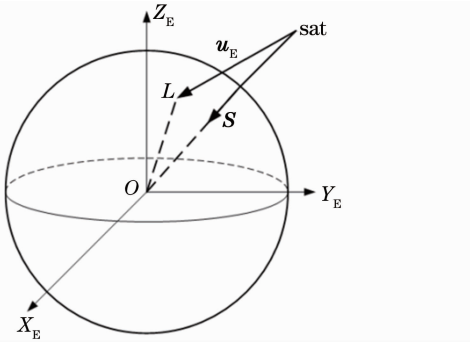


图 3 对地几何成像模型示意图

Fig. 3 Sketch of geometrical model in earth imaging

分别为相机坐标系 C 、卫星本体坐标系 S 、轨道坐标系 B 、地心惯性坐标系 I 和地心旋转坐标系 E ，坐标系的定义同文献[7]，则

$$u_E = R_{I2E} \cdot R_{B2I} \cdot R_{S2B} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$S = R_{I2E} \cdot R_{B2I} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a(1 - e^2)/(1 + e \cos v) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\|\cdot\|$ 表示单位向量, f 为相机焦距, a 为地球长半轴, e 为轨道偏心率, v 为真近点角。

$$R_{S2B} = R_z(-\psi) \cdot R_x(-\varphi) \cdot R_y(-\theta), \quad (4)$$

$$R_{B2I} = R_x(\pi/2) \cdot R_y(\pi/2) \cdot R_y(\Omega) \cdot R_z(i) \cdot R_y(\omega + v), \quad (5)$$

$$R_{I2E} = R_z(-\omega_e t), \quad (6)$$

式中 $R_x(\cdot), R_y(\cdot), R_z(\cdot)$ 分别表示绕 x, y, z 轴的坐标旋转矩阵, ψ, φ, θ 分别为卫星本体坐标系相对于轨道坐标系的偏航角、滚动角和俯仰角, Ω 为升交点赤经, i 为轨道倾角, ω 为近地点幅角, ω_e 为地球自转角速度。

将(1)式和地球椭球模型^[8]结合就能计算出目标的地理坐标 (X, Y, Z) 。反之,已知目标 L 的地理坐标 (X, Y, Z) 和卫星位置 S ,也可以计算出对应像点坐标 (x, y) 。

2.2 对地成像特性分析

线列探测器对地成像时,因奇偶像元沿沿轨方向分开一定距离,在曝光时刻奇偶像元视矢量沿沿轨方向亦分开一定距离,造成线列探测器对地成像区域沿轨方向呈锯齿状错位。

利用相机对地几何成像模型以及奇偶像元在焦平面上的坐标位置,可以计算出任一曝光时刻各像元对地成像位置,随着卫星沿轨道方向的运动,计算各曝光时刻奇偶像元对地成像位置即可得到线列探

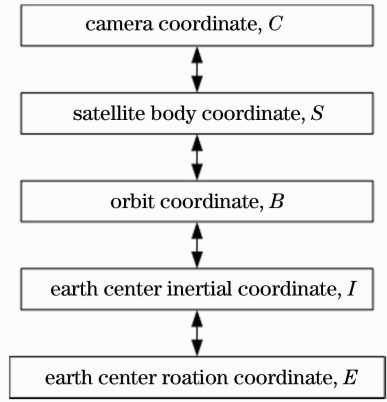


图 4 对地几何成像模型中主要坐标系间的转换关系
Fig. 4 Transformation relationship among the main reference coordinates in an earth imaging geometrical model

测器对地成像区域,图 5 为卫星在赤道附近时线列探测器的对地成像区域,为了方便说明现象,这里仅计算了 8 个像元的对地成像情况。其中图 5(a)为卫星降轨时 8 个像元的对地成像情况,从图中可以看出像元 1~2、3~4、5~6、7~8 间存在重叠,而像元 2~3、4~5、6~7 则存在漏缝,奇偶像元在沿沿轨方向错开约 2 pixel;图 5(b)为卫星升轨时的对地成像情况,与卫星降轨时情况相反,像元 2~3、4~5、6~7 存在重叠,而像元 1~2、3~4、5~6、7~8 存在漏缝,奇偶像元在沿轨方向亦错开约 2 pixel。这说明交错排列线列探测器所摄图像不仅在沿轨方向上存在错位现象,在探测器线列方向上亦存在重叠或漏缝错位现象,线列方向上的错位现象与卫星运动方向有关,主要是由偏流角引起的。

奇偶像元在卫星升轨运行时出现漏缝、在卫星降轨时出现重叠则说明造成线列方向错位现象主要是由偏流角引起的,因为地球自转引起的偏流角方向在卫星升轨、降轨时分别偏向焦平面 $\pm y$ 方向。

为了进一步说明奇偶像元对地成像的几何特性,建立下述分析模型^[8],如图 6 所示,某一时刻 t ,通过对地几何成像模型计算出奇像元 O_n 和奇像元 O_{n+1} 之间的虚拟像元 $O_d(x_1, y_1)$ 对地成像的目标位置 L ,即理想状态下目标 L 应为奇像元 O_n 和奇像元 O_{n+1} 的相邻像元。随着卫星的前向运动,目标 L 像点在焦平面上朝 x 轴正方向运动,经过时间 Δt 后,目标 L 像点必定运动到偶像元所在线列上,由于偏流角等因素的影响,目标 L 并不能成像到偶像元 E_n 位置,而是成像于 E_d 位置,通过对地几何成像模型可以计算出目标 L 像点运动到 E_d 位置需要的时间 Δt 以及 E_d 在偶像元线列上所处的位置 (x_2, y_2) 。

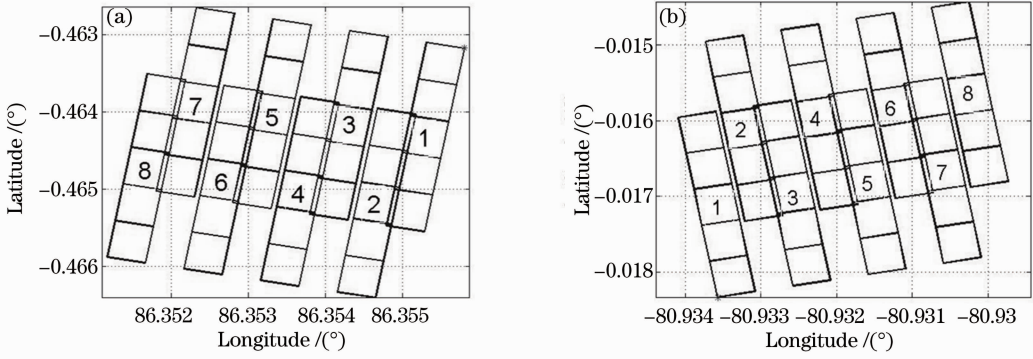


图 5 交错排列线列探测器对地成像范围。(a)卫星降轨；(b)卫星升轨

Fig. 5 Footprint of the staggered linear array. (a) On a descending pass; (b) on an ascending pass

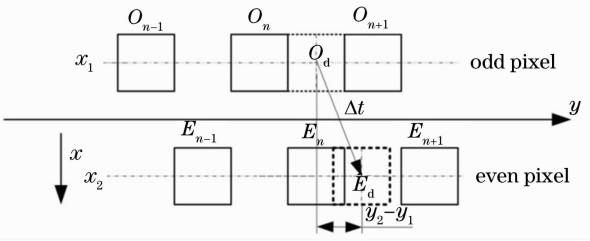


图 6 错位变形分析模型

Fig. 6 Analysis model of stagger distortion

x_1, x_2 分别为奇像元线列、偶像元线列在焦平面上沿沿轨上的位置,由于相机行周期 t_{line} 为固定值,因此可以由 Δt 的值计算出奇偶像元沿扫描方向的错位位移 u_x 。在计算出目标 L 在偶像元线列上的坐标 y_2 后,也可以计算出奇偶像元的重叠或漏缝宽度 u_y 。

$$u_x = \Delta t / t_{line}, \quad (7)$$

$$u_y = (y_2 - y_1) / a_{pixel}. \quad (8)$$

通过对地几何成像模型计算出 t 时刻虚拟像元 $O_d(x_1, y_1)$ 对应目标 L 的坐标 (X, Y, Z) , 目标 L 与相机投影中心构成视向量 $r(\Delta t)$ 。经过时间 Δt 后,目标 L 成像于 E_d 位置,像点、投影中心以及目标 L 共线, $r(\Delta t)$ 位于由投影中心以及偶像元线列构成的

平面内,即 $r(\Delta t)$ 与该平面的法向量 $n(\Delta t)$ 正交,满足 $r(\Delta t)n(\Delta t) = 0$ 。

构建视向量 $r(\Delta t)$ 和法向量 $n(\Delta t)$ 的内积方程为 $f(\Delta t) = r(\Delta t)n(\Delta t)$ 。 (9)

求当 $f(\Delta t) = 0$ 时对应的 Δt 值,即可知道目标 L 成像于 E_d 位置上时的时间 $t + \Delta t$ 。上述式子是一个非线性方程,可以使用牛顿迭代法求解,迭代关系为

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n - \frac{f(\Delta t_n)}{fL'(\Delta t_n)} = t_n - \frac{f(t_n)}{[f(t_n + t_{step}) - f(t_n - t_{step})] / 2t_{step}}, \quad (10)$$

式中 n 为迭代次数, t_{step} 为时间计算步长,其值可以取 t_{line} , t_{line} 为 8 ms, t_c 为收敛阈值,当 $|\Delta t_{n+1} - \Delta t_n| < t_c$ 时,视为收敛, t_c 可以选择一个较小的值。

图 7 为利用轨道参数以及相机参数计算出来的沿轨道方向的错位位移和奇偶像元重叠或漏缝宽度,奇偶像元沿轨道方向的错位位移与星下点纬度成正比,在赤道附近最小约为 1.94 pixel,在靠近两极附近有最大值 2.01 pixel,卫星升降轨时情况基本相同;奇偶像元的重叠或漏缝宽度与星下点纬度

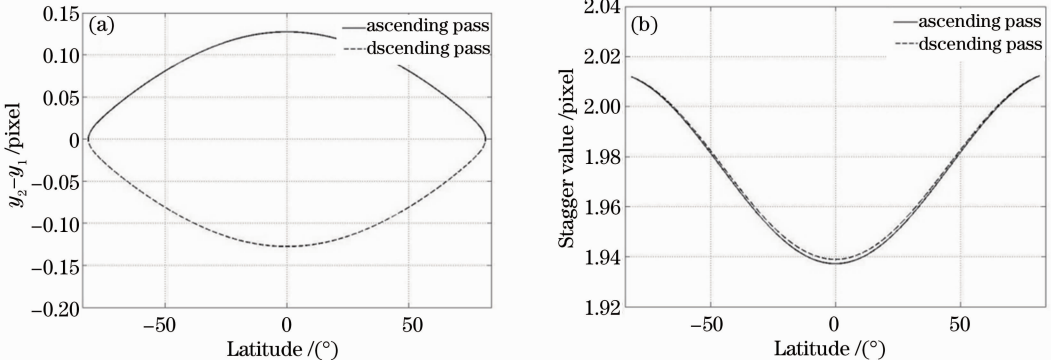


图 7 错位位移分析结果。(a)线列方向；(b)沿轨方向

Fig. 7 Analysis result of stagger value. (a) Along the direction of the linear array; (b) in the along track direction

成反比,在赤道处有最大值 0.13 pixel,在靠近两极附近最小为 0 pixel,卫星升降轨时情况相反,即某对奇偶像元在卫星升轨时存在重叠,则在卫星降轨时出现漏缝。

图 8 为加入地面高程、姿轨扰动等因素后利用蒙特卡洛法的分析结果,其中,轨道定位精度为 0.1 km、稳定度优于 0.01 km/s,姿态指向精度为 0.1° 、姿态稳定度为 $0.01^\circ/\text{s}$,被摄目标高程最大值设定为 8 km。从图中可以看出,奇偶像元沿轨道方向的错

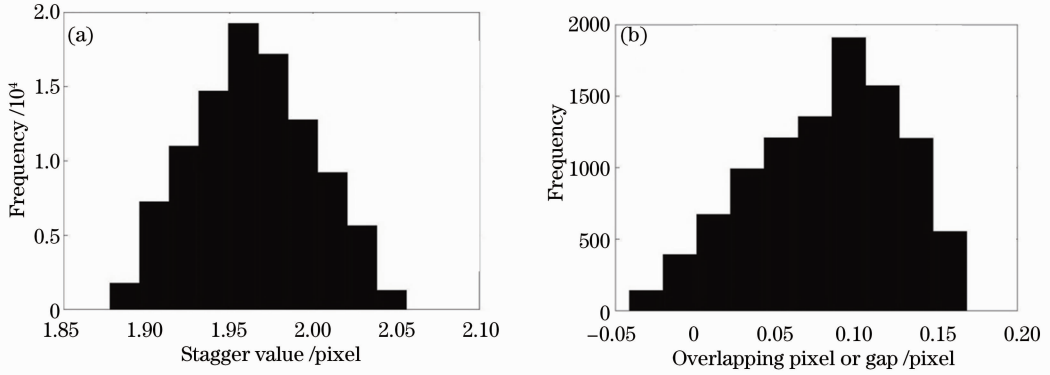


图 8 错位位移蒙特卡洛分析结果。(a)线列方向;(b)沿轨方向

Fig. 8 Monte-Carlo analysis results of stagger value. (a) Along the direction of the linear array; (b) along track direction

3 错位校正方法

从交错排列线列探测器对地成像几何特性的分析结果可知,交错排列线列探测器的错位变形比较复杂,由于每一行成像数据的外方位元素不同,对每一行、每一列数据而言,其错位变形均不一样,因此不能采用常规的多项式变换来描述该变形效果,如果采用文献[5]所述错位校正方法,需要高精度的相机几何成像模型以及高采样率、高精度的卫星姿轨数据,这一需求往往很难实现。针对这一特点,提出了一种基于光流场的错位校正方法,为了保证遥感图像的几何特性,以奇数列图像作为参考,利用奇数列图像和偶数列图像的空间相关性,通过图像块匹配方法估计偶数列图像块对应奇数列图像块的平移参数,得到偶数列图像的运动光流场,利用插值方法对偶数列图像进行插值重构,实现错位校正。

图像块匹配^[9]方法直接决定了最终图像错位校正结果,由于错位变形量一般为亚像元,需要图像块匹配方法具有很高的匹配精度,这里采用文献[10]提出的扩展的相位相关方法,该方法对匹配图像灰度依赖较小,具有较强的抗干扰能力以及很高的匹配精度。错位校正方法具体步骤如下:

1) 将原始线列探测器图像分成奇数列图像和

位位移分布范围为 1.88~2.06 pixel,而奇偶像元重叠或漏缝宽度分布范围为 $-0.04\sim 0.17$ pixel,可见,姿轨扰动、地面高程等因素的影响也不可忽略。因此,在交错排列线列探测器对地推扫成像过程中,相邻奇偶列数据沿轨道方向的错位变形以及重叠或漏缝宽度错位变形随被摄景物地理位置、高程、姿轨扰动等因素的变化而变化,其值非固定值,奇偶列图像变形较为复杂,不能简单利用固定值进行错位校正。

偶数列图像,将偶数列图像按照一定的大小和间隔均匀划分为图像块,为了精确描述偶数列图像相对于奇数列图像的错位变形同时不影响图像块匹配精度,图像块的大小选取 $64\text{ pixel}\times 64\text{ pixel}$,图像块间距为 32 pixel。为提高图像块的匹配精度,可以先估计偶数列图像相对于奇数列图像在沿轨方向上的整数位移,将偶数列图像沿图像行方向整体平移后再进行图像块匹配操作;

2) 图像中一些无显著特征的图像区域在图像块匹配过程中往往会给出错误的平移估计,可以利用相位相关系数 c 的大小来剔除这些错误估计,错误估计剔除阈值设定为 $T_c = \text{mean}(c_i) - \text{std}(c_i)$,其中 c_i 为各图像块相位相关系数;

3) 为了得到完整的偶数列图像运动光流场,需要赋予剔除掉平移值的图像块新的值,这里采用 $3\text{ pixel}\times 3\text{ pixel}$ 邻域中值调整,即每一个需要重新赋予的平移值可以由邻域 8 个平移值的中值代替,中值调整在图像行、列方向上分别迭代进行,直到得到完整的光流场;

4) 已知偶数列图像相对于奇数列图像的运动光流场后,插值可以得到每一偶数列图像像素点在奇数列图像中的位置,通过灰度插值和重采样可以将偶数

列图像校准至奇数列图像,从而完成错位校正。

在整个错位校正过程中,奇数列图像作为块匹配基准,不做任何处理。

为了验证上述错位校正方法的有效性,选择以下两组图像进行实验验证。

3.1 仿真图像实验

仿真实验图像为 $1024 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 大小的可见光图像,由线列探测器对地推扫成像而成,探测器由 512 个像元顺序排列组成,不存在由于像元交错排列带来的错位变形,可用于验证错位校正方法的校正精度,将可见光图像偶数列向下平移 0.43 pixel,向右平移 0.15 pixel,用于仿真由于探测器交错排列带来的错位变形,如图 9(a)所示。图 9(b)为错位校正方法计算得到的光流场,由于已知图像的错位变形参数,可以采用光流场计算结果来评估该方法的校正精度。

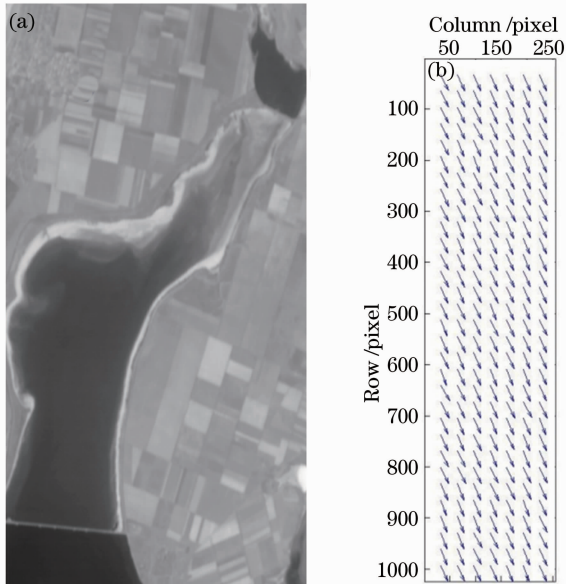


图 9 仿真图像和评估光流场。(a)可见光图像;
(b)光流场

Fig. 9 Simulation image and estimated optical flow field.

(a) Visible image; (b) optical flow field

由计算结果可知,错位校正方法在列方向错位变形计算结果均值为 0.42 pixel,标准方差为 0.028 pixel,行方向错位变形计算结果均值为 0.12 pixel,标准方差为 0.033 pixel,可见图像块匹配方法精度很高,错位校正精度优于 0.1 pixel,能满足错位变形计算要求。

3.2 真实图像实验

图 10(a)为红外相机对地遥感原始图像,图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,仅经过非均匀性校正处理,图 10(b)为经过错位校正后的图像。从两幅

图像中可以清晰地看到海岸线以及桥梁等目标的错位变形已经完全被校正,图像可视效果改善明显。图 11(a)为偶数列图像相对于奇数列图像的运动光流场,计算得到沿轨方向错位位移分布范围在 1.72~2.07 pixel 之间,沿线列方向的重叠或漏缝位移分布范围在 0.05~0.18 pixel 之间,与前述蒙特卡洛分析结果基本一致,计算偏差源于相机对地成像几何模型以及焦平面几何模型的不准确性。

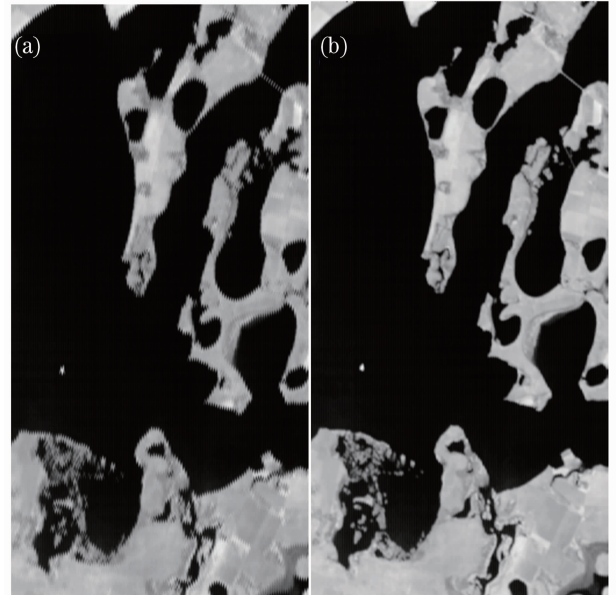


图 10 图像错位校正。(a)原始红外图像;
(b)错位校正图像

Fig. 10 Stagger correction of the image. (a) Raw infrared image; (b) stagger corrected image

由于无法预知实际图像奇、偶列的错位变形值,不能采用常规的精度评价方法来评估图像错位校正方法的校正效果。相对于地物的尺寸,相邻奇偶列图像可视为对同一地物的观测结果,相邻奇偶列图像应具有很高的空间相关性,但由于图像的错位变形,会使得这种空间相关性降低,因此,可以采用相邻奇偶列图像的归一化相关系数(NCC)^[11]来评估错位校正结果,对错位变形描述得越准确,归一化相关系数数值越高,反之亦然。

图 11(b)为采用光流场描述错位变形的错位校正结果与按照固定值 1.86 pixel 进行校正的错位校正结果得到的相邻奇偶列图像归一化相关系数的差值曲线。可以看出,奇偶列图像的归一化相关系数平均提高了 0.0023,错位校正结果显著优于采用固定值校正的结果,证明了采用光流场要比固定值更能准确地描述图像的错位变形,验证了所提出的错位校正方法的有效性。

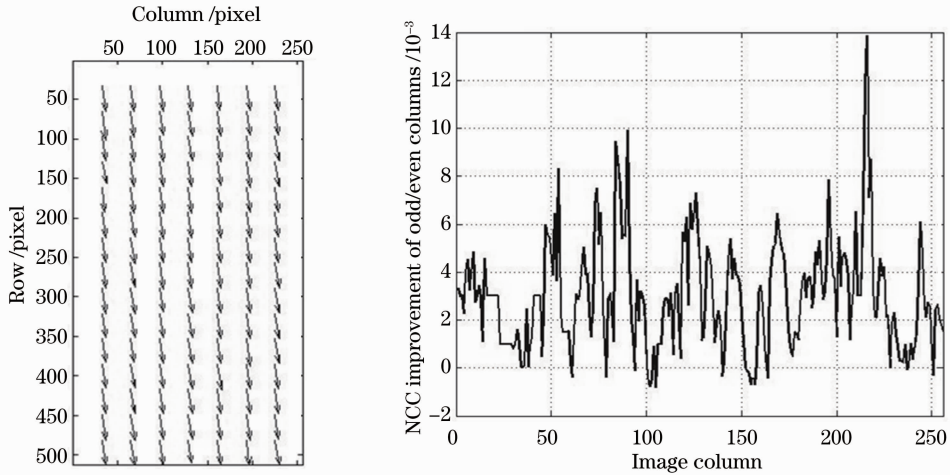


图 11 图像光流场和性能评估。(a)光流场；(b)奇偶列图像相关系数增量

Fig. 11 Optical flow field and performance evaluation. (a) Estimated optical flow field; (b) NCC improvement of odd/even columns

4 结 论

交错排列线列探测器对地推扫成像,其遥感图像会在沿轨方向和线列方向均产生错位变形。由于探测器固有的几何结构以及被摄景物地理位置、高程、卫星姿轨扰动等因素的影响,错位位移并不能被视为固定值,而是一个随成像条件变化而变化的值,针对交错排列线列探测器对地成像图像变形的复杂性,提出了一种基于光流场的错位校正方法,采用光流场能比较准确地描述这一变形,而扩展的相位相关方法能保证光流场计算结果的精度。仿真、真实遥感图像的错位校正结果验证了该方法的有效性。随着遥感技术的发展,空间相机的焦距越来越长、探测元尺寸越来越小以及相机为缩短重访周期而进行的大幅度侧摆以及前后摆,交错排列线列探测器带来的错位变形将显著增大,且不能被忽视,错位变形必须得到精确校正才能满足遥感图像应用对图像几何精度日益增长的要求。错位变形分析方法以及错位校正方法对空间相机的设计以及后续图像处理具有实际指导意义。

参 考 文 献

- Li Deren. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322.
- 李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星-资源三号测绘卫星[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 317-322.
- De Lencioni, C J Digenis, W E Bicknell, *et al.*. The EO-1 advanced land imager: an overview [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(2): 165-180.
- Cai Haijiao, Xu Meng, Wei Jun. Principle and design of data

process system of pushbroom infrared camera [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(3): 447-450.

蔡海蛟, 徐 蒙, 危 峻. 推扫式红外相机数据处理系统原理与设计[J]. *半导体光电*, 2007, 28(3): 447-450.

- Liu Sufang, Li Jianlin, Pan Ming, *et al.*. Dislocation correction of long linear infrared detectors [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(11): 621-624.

刘素芳, 李建林, 潘 鸣, 等. 红外长线列探测器位置错位校正方法[J]. *红外技术*, 2009, 31(11): 621-624.

- P V Radhadevi, S S Solanki, R Ramchandran, *et al.*. Pre-processing considerations of IRS-P6 LISS-4 imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(2): 133-139.

- Wang Jiaqi. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 27-29.

王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所教材, 2003. 27-29.

- Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589.

王家骥, 于 平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1585-1589.

- Guo Qiang, Zhang Xiaohu. Image shift compensation modeling and analysis for two-dimensional scanning on geostationary orbit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1779-1787.

郭 强, 张晓虎. 地球同步轨道二维扫描像移补偿技术建模与分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1779-1787.

- Hu Chunhui, Yan Changxiang, Shao Jianbing. Pointing mirror low frequency sine oscillation induced remote sensor image distortion and correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428002.

胡春晖, 颜昌翔, 邵建兵. 指向镜低频正弦振动下遥感器图像的畸变及校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428002.

- Wang Yun, Sun Shengli, Lin Changqing. Calculation of overlapping pixels of staggered linear array detectors for space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0128003.

王 运, 孙胜利, 林长青. 空间相机交错拼接线列探测器重叠像元数计算[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0128003.

- Zhu Haijiang, Xu Xiaobo, Zhou Jinglin. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection

- [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0215001.
- 祝海江, 徐晓波, 周靖林. 基于球面投射投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0215001.
- 10 Wang Yun, Yan Changxiang. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 661-667.
- 王 运, 颜昌翔. 光谱仪图像亚像素配准[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 661-667.
- 11 Sun Minglei, Wen Wen, Zong Guanghua. A method for fast measuring line-shaped image feature based on normalized cross correlation operator [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2041-2046.
- 孙明磊, 文 闻, 宗光华. 基于标准互相关算子的直线图像特征快速测量方法[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2041-2046.

栏目编辑: 张浩佳