

航空交错 TDI 红外影像复原

陈王丽¹ 孙涛² 秦前清¹ 石强¹ 马国锐¹

摘要 针对航空交错延时积分 (Time delay and integration, TDI) 红外影像奇数行和偶数行之间灰度差异、错动以及影像降晰问题, 提出了一种交错 TDI 红外影像复原方法. 首先采用对影像灰度差异不敏感的基于相位相关 (Phase-only correlation, POC) 的位移估计方法估计奇数行影像和偶数行影像之间的亚像素精度位移场. 其次以奇数行影像为参考, 根据位移估计结果对偶数行影像做点对点灰度校正, 并对齐奇数行影像和灰度校正后的偶数行影像. 最后采用 BTV (Bilateral total variation) 正则化超分辨率重建方法反降晰, 得到复原影像. 实验结果表明复原影像中奇偶行的错动得到有效补偿, 地物的边缘和纹理结构更加清晰, 影像质量显著提高.

关键词 交错延时积分, 相位相关, 位移估计, 影像复原

引用格式 陈王丽, 孙涛, 秦前清, 石强, 马国锐. 航空交错 TDI 红外影像复原. 自动化学报, 2015, 41(2): 353–361

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140287

Restoration of Infrared Images Captured by Aerial Staggered TDI Cameras

CHEN Wang-Li¹ SUN Tao² QIN Qian-Qing¹ SHI Qiang¹ MA Guo-Rui¹

Abstract The infrared images captured by aerial staggered time delay and integration (TDI) cameras suffer from gray difference and stagger displacement between the odd field and even field, as well as blur owing to the long integrated exposure time. In order to restore the images, a POC (Phase-only correlation)-based motion estimation method is employed to estimate the motion field between the odd and even fields, because the POC is independent of gray differences between image pairs and can achieve sub-pixel accuracy. The motion field is then used for pixel-to-pixel gray correction of the even field with the odd field as the reference, and the odd field and the corrected even field are aligned. Finally, a BTV-based super-resolution algorithm is used for deblurring. Experimental results show that the displacement is effectively compensated, texture and edges are sharper and clearer, and the quality of the restored image is improved obviously.

Key words Staggered TDI, phase-only correlation (POC), motion estimation, image restoration

Citation Chen Wang-Li, Sun Tao, Qin Qian-Qing, Shi Qiang, Ma Guo-Rui. Restoration of infrared images captured by aerial staggered TDI cameras. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(2): 353–361

红外成像时, 航空延时积分 (Time delay and integration, TDI) 传感器能够获得比普通线阵 CCD (Charge-coupled device) 信噪比更高的影像, 是一种获取高分辨率红外影像的重要手段. TDI 的每一个成像单元由 N 个光敏元在垂直于 TDI 线阵方向排列组成, N 为 TDI 的阶数. 当传感器成像时, 每个光敏元的信号沿扫描方向的反方向依次传递累加, 得到最终的信号值 (如图 1 所示). 相比于同等级的普通线阵 CCD 传感器, TDI 获取的影像

的信噪比可以提高 $N^{\frac{1}{2}}$ 倍^[1]. 随着 TDI 列阵长度的增加, 受物理上的限制^[2], 一般采用奇偶行交错排列的模式. 这一设计在扩大传感器成像范围的同时能有效减少相邻像素间信息的丢失. 获取本文数据的为摆扫式^[3–5] 航空交错 TDI 红外传感器, 传感器的 TDI 列阵方向平行于平台的飞行方向, 扫描方向垂直于飞行方向. 传感器的光敏元排列结构如图 1 所示^[6–7], 由图 1 可知在机械设计上奇数行和偶数行影像在列阵方向的距离为 0.5 个像素, 扫描方向的距离为 N 阶 TDI 的宽度与奇偶行之间空白区域宽度之和.

在 TDI 红外传感器成像过程中, 除了传感器平台 (飞机) 的运动外, 还存在频繁的振动, 这些振动包括传感器电子冷却系统、伺服电机、平台的振动, 以及摆扫成像过程中镜筒绕转轴转动引起的振动等. 虽然传感器在机械设计时会考虑这些因素, 并能在一定程度上减弱部分振动, 但是不可能完全消除. 这些振动因素使得奇数行列阵和偶数行列阵在获取同一地物信息时处于不同的位置和姿态, 从而造成交

收稿日期 2014-04-22 录用日期 2014-08-18
Manuscript received April 22, 2014; accepted August 18, 2014
国家自然科学基金 (41171450, 61001187), 中国航天科技集团公司卫星应用研究院创新基金 (2014_CXJJ-YG_03)

Supported by National Natural Science Foundation of China (41171450, 61001187), and Open Research Fund of the Academy of Satellite Application (2014_CXJJ-YG_03)

本文责任编辑 潘泉

Recommended by Associate Editor PAN Quan

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079 2. 武汉大学电子信息学院 武汉 430079

1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079 2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079

错 TDI 影像奇偶行之间的错位 (机械设计造成的错位已补偿). 而且这些错位并不是一个常数, 不能用平移模型或者仿射变换模型来描述. 如图 2 所示, 横向为扫描方向, 1、2、3、4 标记图像中的不同区域, 从局部放大图可见在这些区域奇偶行影像错动的程度不同. 关于传感器振动对影像质量的影响的研究主要集中在一般线阵 CCD 传感器^[8-9], 以及常规 TDI 传感器^[10], 对交错 TDI 传感器的相关研究比较少. 此外, 交错 TDI 传感器的奇偶行相对独立成像, 像元响应不完全相同, 造成奇偶行影像的灰度差异. 并且在传感器成像过程中, 光学系统的降晰作用是不可避免的. 综上, 交错 TDI 红外影像质量下降表现为奇偶行影像错位、奇偶行影像灰度差异, 以及影像降晰. 本文从这三个方面实现交错 TDI 红外影像复原.

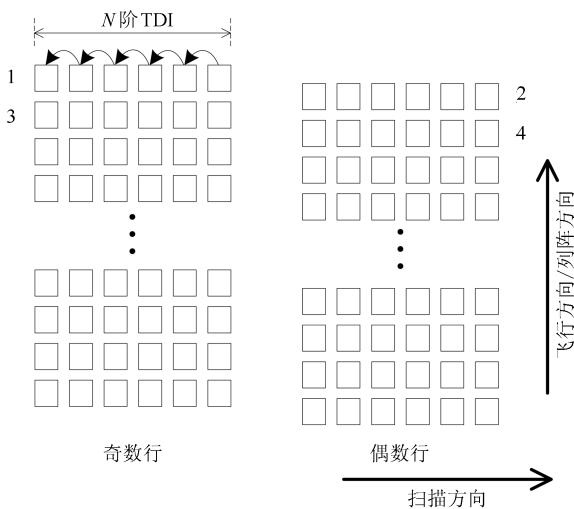


图 1 交错 TDI 光敏元排列结构图

Fig. 1 Staggered TDI camera configuration

以色列班固利恩大学 (Ben-Gurion University of the Negev) 的一个课题组对交错 TDI 传感器影像复原做了大量的研究工作^[1,11-14]. 文献 [1] 用光流法估计奇偶行影像之间的位移, 然后用凸集投

影 (Projection onto convex sets, POCS) 法去模糊. 文献 [11] 提出了几种基于块匹配的方法, 同时考虑传感器振动和地物移动造成的奇偶行错位问题. 文献 [12] 通过最小二乘算法构建局部滤波器, 从而实现奇偶行影像的对齐. 文献 [13] 分别估计奇数行影像和偶数行影像的降晰函数, 再用块匹配方法对齐去模糊后的奇偶行影像. 文献 [14] 认为奇/偶行影像每一列像素的位移可以用横向位移、纵向位移和旋转角度三个参数来描述, 用最小二乘方法估计这三个参数, 从而实现奇偶行影像对齐. 光流方法^[15-16]、块匹配方法、最小二乘方法均以像素灰度为基础, 基于同一地物点在奇数行影像和偶数行影像上灰度一致的假设. 然而本文所用航空交错 TDI 影像奇数行和偶数行的灰度存在差异, 这使得以上方法均不适用. 且块匹配方法假设一个图像块内所有像素点的位移相同, 而在交错 TDI 奇偶行影像的位移估计中, 这一假设往往并不成立.

影像位移估计属于影像配准的范畴, 影像配准可分为基于灰度的方法和基于特征的方法, 其中基于灰度的方法又分为空域方法和频域方法. 相对于空域方法, 频域方法^[17-19] 因具有较高的亚像素配准精度而得到广泛研究. 其中文献 [19] 提出的相位相关 (Phase-only correlation, POC) 方法在影像存在全局位移时, 位移估计精度达到 0.01 像素. 频域方法的另一个优点是以傅里叶变换的时移性为基础, 对影像的灰度差异具有更强的鲁棒性, 因此适用于本文奇偶行影像存在灰度差异的情况. 本文采用基于 POC 的位移估计方法估计交错 TDI 红外影像奇数行和偶数行之间的错位; 之后以奇数行影像为参考影像, 根据位移估计结果对偶数行影像做灰度校正, 解决奇数行和偶数行影像灰度差异问题; 并对奇数行影像和经灰度校正后的偶数行影像. 最后采用 BTV (Bilateral total variation) 正则化超分辨率重建方法反降晰, 减弱光学系统造成的影像降晰, 得到复原影像. 算法的总体流程如图 3 所示.

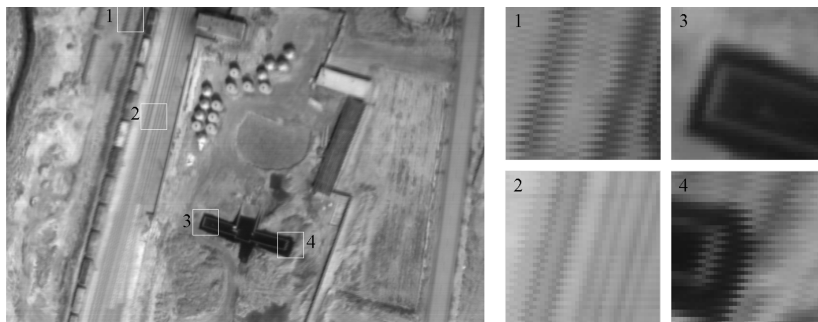


图 2 航空交错 TDI 红外影像

Fig. 2 Image of aerial staggered TDI camera

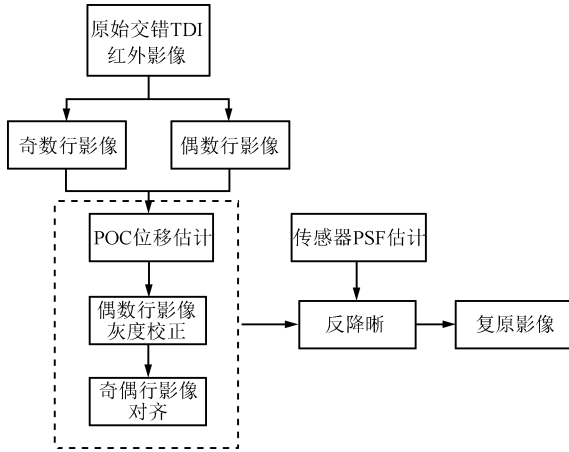


图3 算法流程

Fig. 3 Flowchart of the proposed algorithm

1 方法描述

1.1 基于 POC 位移估计的灰度校正和影像对齐

POC 位移估计方法的基本原理是傅里叶变换的时移性: 两个信号在空域的平移关系在频域表现为相位差. 给定两幅影像 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$, 两者在横向和纵向的位移分别为 δ_x 和 δ_y , 即 $g(x, y) = f(x - \delta_x, y - \delta_y)$. 根据傅里叶变换的时移性, 其傅里叶变换的关系为

$$G(u, v) = F(u, v)e^{-j\frac{2\pi}{N_1}u\delta_x}e^{-j\frac{2\pi}{N_2}v\delta_y} \quad (1)$$

其中, $F(u, v)$, $G(u, v)$ 分别为 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的离散傅里叶变换, N_1 和 N_2 为影像横向和纵向的尺寸. 则 $F(u, v)$ 和 $G(u, v)$ 的交叉相位谱为

$$\hat{R}(u, v) = \frac{F(u, v)\overline{G(u, v)}}{|F(u, v)\overline{G(u, v)}|} = e^{j\frac{2\pi}{N_1}u\delta_x}e^{j\frac{2\pi}{N_2}v\delta_y} \quad (2)$$

其中, $\overline{G(u, v)}$ 是 $G(u, v)$ 的共轭转置. POC 函数定义为 $\hat{R}(u, v)$ 的二维离散反傅里叶变换:

$$\hat{r}(x, y) = \frac{1}{N_1N_2} \sum_{u, v} \hat{R}(u, v)e^{j\frac{2\pi}{N_1}ux}e^{j\frac{2\pi}{N_2}vy} \approx \frac{\alpha}{N_1N_2} \cdot \frac{\sin\{\pi(x + \delta_x)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(x + \delta_x)\}} \cdot \frac{\sin\{\pi(y + \delta_y)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_2}(y + \delta_y)\}} \quad (3)$$

可见, POC 函数仅与影像空间移动引起的相位差有关, 因此对影像灰度的差异不敏感. 在理想情况下, 即 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 仅存在空间位移时, 式 (3) 中 $\alpha = 1$. 随着 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 相似度的降低, α 的值急剧下降. 从式 (3) 可见 POC 函数 $\hat{r}(x, y)$ 的峰值位置 (δ_x, δ_y) 即是 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 之间的位移量. 由于 (δ_x, δ_y) 一般处于非整数位置, 需要在峰

值位置附近选取适当大小的区域来拟合 POC 函数, 从而得到亚像素精度的位移估计. 为了减弱信号非周期造成的频谱泄露对位移估计精度的影响, 通常对 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 加窗, 如 Hanning 窗; 同时对交叉相位谱 $\hat{R}(u, v)$ 滤波消除混叠^[19]. 相应地, POC 函数的表达形式也会改变.

由前文知 POC 方法可用于影像之间的全局位移估计, 而交错 TDI 奇偶行影像之间的位移并不能用全局平移模型来描述, 因此本文以奇数行影像各像素点为中心某一尺寸的窗口相对于偶数行影像对应窗口的位移作为该像素点的位移, 具体步骤如下:

- 1) 在原图中分别抽取奇数行和偶数行影像.
- 2) 设定窗口大小, 用 POC 方法估计奇数行影像和偶数行影像对应位置窗口的位移, 作为窗口中心像素点的位移. 依次计算所有像素点的位移, 得到扫描方向和列阵方向的位移图.
- 3) 对位移图滤波, 消除异常值.

图 4 所示为图 2 的奇数行和偶数行影像在扫描方向和列阵方向的位移估计. 从图 4 可见, 扫描方向的位移显著大于列阵方向的位移. 在扫描方向和列阵方向, 同一列像素点的位移在整体上呈现一致性,

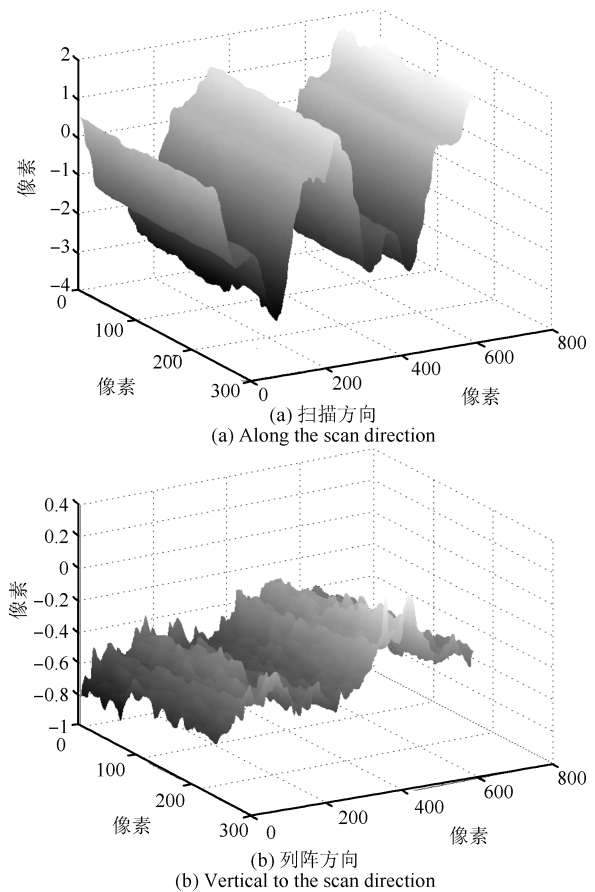


图4 奇数行影像和偶数行影像位移估计

Fig. 4 Motion estimation between odd and even fields

但同时存在微小差异. 本文认为每一列像素点在列阵方向(扫描方向)的整体位移由探测器整体在列阵方向(扫描方向)的振动引起; 而微小位移差异是因为交错 TDI 探测器并不是一个严格的刚体, 其每一个成像单元在列阵方向(扫描方向)都存在独立的微小振动. 由于探测器整体在列阵方向的振动幅度小于扫描方向的振动幅度, 使得同一列像素点的这种微小位移差异在列阵方向上表现的更为显著.

为研究扫描方向和列阵方向位移的规律, 取大小为 100×5000 的原始影像(100 为列阵方向尺寸, 5000 为扫描方向尺寸), 估计其奇数行和偶数行影像在扫描方向和列阵方向的位移, 并按列取均值, 得到图 5. 从图 5(a) 可见扫描方向的位移大致是以 -1 为中心 ± 3 像素范围内上下波动, 且呈现周期性, 周期范围为 $350 \sim 360$ 像素; 从图 5(b) 可见列阵方向位移以 -0.5 为中心小范围上下波动, 但在本文实验中并没有呈现出周期性.

图 6(a) 为根据位移估计结果, 对偶数行影像重采样, 并和奇数行影像对齐后的影像, 局部放大图与图 2 对应, 这里仅考虑扫描方向的位移(认为列阵方向的位移均为 0.5 像素). 从局部放大图可见, 对齐后奇数行影像和偶数行影像在扫描方向的错动得到有效补偿, 但是二者的灰度显著不同. 图 6(b) 为分别以每一奇数行影像为参考, 根据位移估计结果, 对其相邻的偶数行影像做点对点(Point-to-point)灰度校正并校正的结果. 点对点灰度校正的具体步骤为:

1) 设 $\mathbf{X}_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}]$ 为第 i 行影像, i 为奇数, $\mathbf{X}'_{i+1} = [x'_{i+1,1}, x'_{i+1,2}, \dots, x'_{i+1,n}]$ 为对齐后的第 $i+1$ 行影像, 按 $\mathbf{X}_i = a\mathbf{X}'_{i+1} + b$ 拟合参数 (a, b) ;

2) 对第 $i+1$ 行原始影像 $\mathbf{X}_{i+1} = [x_{i+1,1}, x_{i+1,2}, \dots, x_{i+1,n}]$ 做灰度校正, 校正后的第 $i+1$ 行影像 $\mathbf{X}''_{i+1} = [x''_{i+1,1}, x''_{i+1,2}, \dots, x''_{i+1,n}]$ 为 $\mathbf{X}''_{i+1} = a\mathbf{X}_{i+1} + b$;

3) 对齐奇数行影像和经灰度校正的偶数行影像.

经计算, 图 6(a) 中奇数行影像的灰度均值为 138.17 , 偶数行影像的均值为 140.05 ; 而图 6(b) 中经灰度校正后偶数行影像的灰度均值为 138.06 . 可见, 经灰度校正后, 奇数行影像和偶数行影像的灰度从视觉效果和统计数值上均趋于一致.

1.2 TDI 传感器降晰函数

成像系统的降晰作用是造成影像退化的另一个重要原因, 通常用成像系统的点扩散函数(Point spread function, PSF) 来描述. 传感器静止时, 每一阶 TDI 光敏元的 PSF 在扫描方向和列阵方向均为矩形. 扫描成像时, 如果扫描步长等于像元对应地面距离, 且传感器稳定没有振动, 每一阶 TDI 光敏元在扫描方向的 PSF 为两个矩形的积分, 即如图 7 中所示的三角形, 在列阵方向与传感器静止时相同. 则 N 阶 TDI 整体 PSF 在扫描方向为 N 个三角形

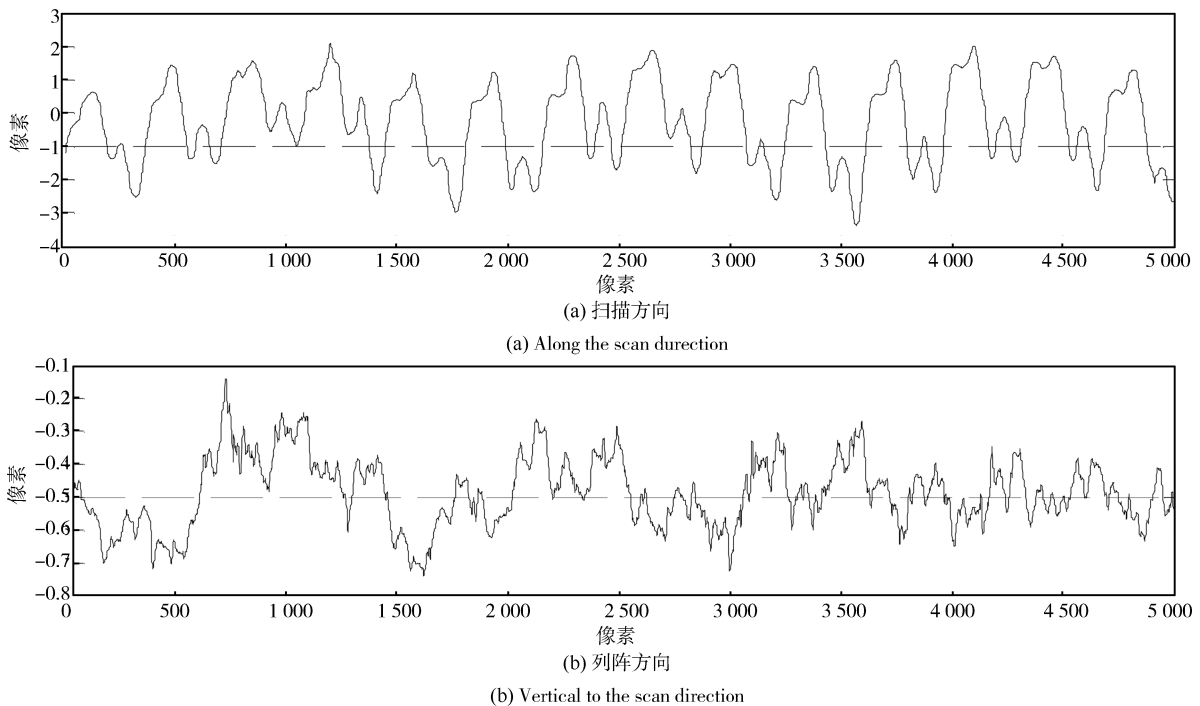


图 5 扫描方向和列阵方向位移

Fig. 5 Motion estimation along the scan direction and vertical to the scan direction

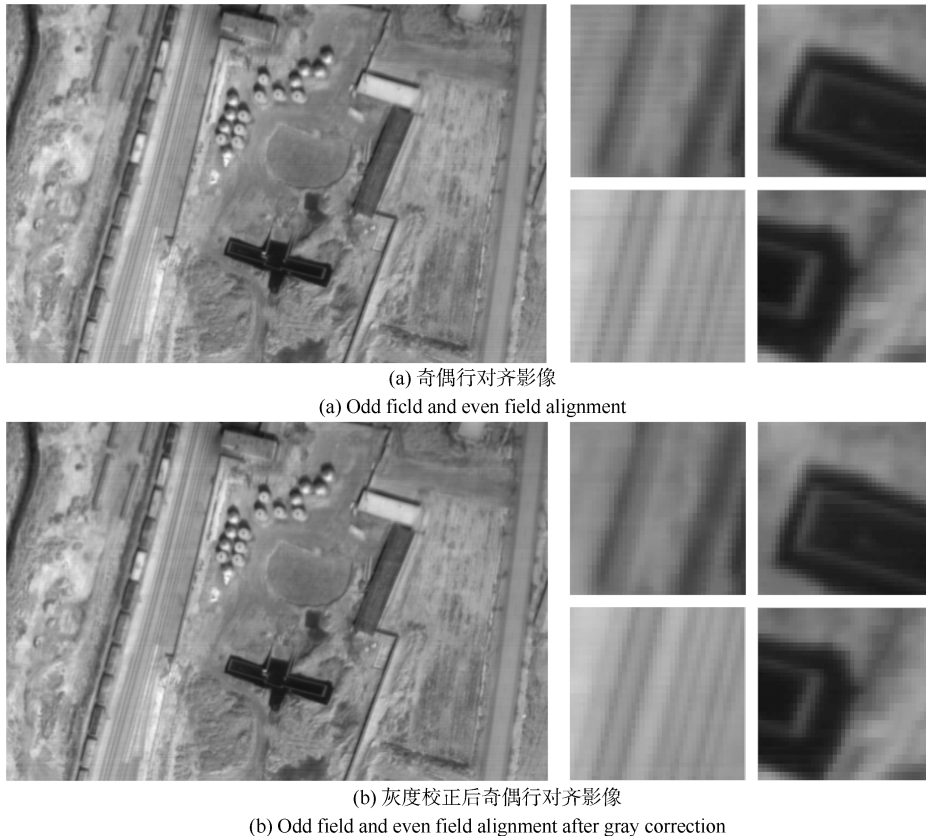


图 6 灰度校正及影像对齐
Fig. 6 Gray correction and fields alignment

PSF 的积分 (图 7 中实曲线), 在列阵方向仍为矩形. 如果忽略各成像单元的独立振动, 可以认为在同一时刻所有 TDI 成像单元的 PSF 相同, 即同一列影像的 PSF 相同. 而传感器整体的振动对 PSF 造成两个影响: 1) 拓宽了 PSF 的范围; 2) 改变了 PSF 几何中心的位置. 这两个影响造成的结果是: 1) 使得 PSF 是空间可变的, 即不同列影像的 PSF 不同; 2) 使得影像存在几何形变. 传感器整体在扫描方向的振动对 PSF 的影响如图 7 中虚曲线所示.

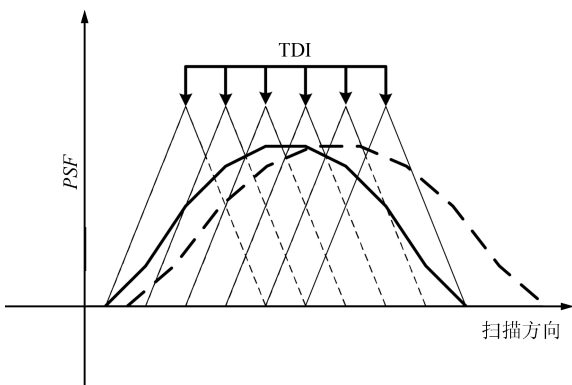


图 7 TDI 传感器 PSF 估计
Fig. 7 PSF estimation of TDI camera

为简化模型, 本文假设全局统一 PSF, 仅考虑 TDI 各阶光敏元 PSF 的积分, 以及扫描方向的振动造成的 PSF 的拓宽, 可表示为

$$PSP_{total} = PSF_{sensor} * PSF_{vibration} \quad (4)$$

式中, $PSF_{sensor} = \sum_{i=1}^N PSF_{TDIstage,i}$ 表示各阶光敏元 PSF 的积分, $PSF_{TDIstage,i}$ 表示第 i 阶光敏元的 PSF, N 表示 TDI 的阶数; $PSF_{vibration}$ 表示扫描方向的振动造成的 PSF 的拓宽.

1.3 交错 TDI 红外影像反降晰

将奇数行影像 y_{odd} 和经灰度校正后的偶数行影像 y_{even} 作为输入影像, 影像反降晰采用序列帧超分辨率重建方法^[20-22], 一般模型表示为

$$\hat{X} = \arg \min_X \left(\sum_{k=1}^K \|DHF_k X - y_k\|_1 + \lambda f(X) \right) \quad (5)$$

其中, X 为待估计高分辨率影像, 即反降晰复原影像; y_k 表示第 k 个观测影像, K 为低分辨率观测影像数量; D 为降采样算子; H 为降晰算子; F_k 为与 y_k 对应的几何变换算子; $f(x)$ 为正则化项, λ 为正

则化参数. 式 (5) 中正则化项有多种表达形式, 本文采用能够较好地保持影像边缘信息的 BTV 正则化项^[23-24], BTV 的定义为

$$f_{BTV}(X) = \sum_{l=-P}^P \sum_{m=-P}^P w^{|m|+|l|} \|X - S_x^l S_y^m X\|_1 \quad (6)$$

式中, S_x^l 和 S_y^m 分别表示将影像在横向和纵向平移 l 和 m 个像素的算子, $P \geq 1$ 为移动的范围; w 为权重, 且 $0 < w < 1$. 将式 (6) 代入超分辨率重建模型式 (5), 得到:

$$\hat{X} = \arg \min_X \left(\sum_{k=1}^K \|DHF_k X - y_k\|_1 + \lambda \sum_{l=-P}^P \sum_{m=-P}^P w^{|m|+|l|} \|X - S_x^l S_y^m X\|_1 \right) \quad (7)$$

具体到本文中, $y_1 = y_{\text{odd}}$, $y_2 = y_{\text{even}}$, $K = 2$. 由于复原影像的横向尺寸与奇/偶数行影像相同, 纵向尺寸为奇/偶数行影像的 2 倍, 因此降采样算子 D 的横向 (扫描方向) 降采样因子为 1, 纵向 (列阵方向) 降采样因子为 2. H 由式 (4) 定义的 PSF_{total} 决定. 若以奇数行影像 y_{odd} 为参考影像, 则 F_{odd} 为单位阵, F_{even} 为第 1.1 节计算得到的奇数行影像到偶数行影像的位移场. 式 (7) 可以采用最速下降法求解^[23], 迭代公式见式 (8). 式 (8) 中 β 为最速下降法中梯度方向的步长; S_x^{-l} 和 S_y^{-m} 分别表示将影像在横向和纵向平移 $-l$ 和 $-m$ 个像素的算子; D^T 、 H^T 、 F_k^T 分别为 D 、 H 、 F_k 的逆操作算子. 实验中复原影像的迭代初始值为灰度校正后奇偶行对齐影像. 根据经验及多次试验, 在式 (8) 中取 $\beta = 0.005$, $\lambda = 0.001$, $w = 0.6$, $P = 2$.

$$\begin{aligned} \hat{X}_{n+1} = & \hat{X}_n - \beta \left(\sum_{k=1}^K F_k^T H^T D^T \text{sgn}(DHF_k \hat{X}_n - y_k) + \right. \\ & \lambda \sum_{l=-P}^P \sum_{m=-P}^P w^{|m|+|l|} (I - S_y^{-m} S_x^{-l}) \times \\ & \left. \text{sgn}(\hat{X}_n - S_x^l S_y^m \hat{X}_n) \right) \quad (8) \end{aligned}$$

2 实验结果及分析

图 8~10 为针对不同地物场景的航空交错 TDI 红外影像的复原结果, 从左到右依次为原始影像、奇数行影像在纵向经双立方插值放大两倍的影像、灰度校正后奇偶行对齐影像, 以及本文复原影像. 图 8~10 中的局部放大图对应于各图中方框标记区域.

从实验结果, 特别是局部放大区域可见, 本文复原影像中奇偶行的错动得到有效补偿, 地物的边缘和纹理结构更加清晰, 目标的可辨识性增强.

为定量评价复原影像质量, 分别计算奇数行影像在纵向插值放大两倍的影像、灰度校正后奇偶行对齐影像, 以及复原影像的平均梯度和信息熵, 结果如表 1 所示.

平均梯度的定义为

$$\theta = \frac{1}{(N_1 - 1)(N_2 - 1)} \sum_{i=1}^{N_1-1} \sum_{j=1}^{N_2-1} \sqrt{\frac{(\frac{\partial f_{ij}}{\partial i})^2 + (\frac{\partial f_{ij}}{\partial j})^2}{2}} \quad (9)$$

式中, f 为待评价影像, (N_1, N_2) 为影像的大小, $(\frac{\partial f_{ij}}{\partial i}, \frac{\partial f_{ij}}{\partial j})$ 表示影像 f 在 (i, j) 位置横向和纵向的梯度.

表 1 交错 TDI 红外影像复原定量评价
Table 1 Evaluation of the restored images of staggered TDI camera

	影像类型	平均梯度	信息熵
图 8	插值影像	5.398	7.397
	对齐影像	5.568	7.379
	复原影像	7.865	7.444
图 9	插值影像	4.811	7.267
	对齐影像	4.982	7.253
	复原影像	6.796	7.337
图 10	插值影像	3.607	6.772
	对齐影像	3.782	6.762
	复原影像	5.824	6.856

对于灰度范围为 $[0, 255]$ 的影像, 信息熵的定义为

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log_2 p_i \quad (10)$$

式中, p_i 为影像中灰度值为 i 的像素出现的概率, 可近似取灰度值 i 出现的频率. 平均梯度和信息熵均为无参评价指标, 平均梯度表征图像的锐利程度, 一般平均梯度越大, 图像越清晰; 信息熵表征图像的信息量, 信息熵越大则图像的信息量越大. 从表 1 可见, 相对于插值影像和对齐影像, 本文复原影像的平均梯度和信息熵均最大. 表明本文方法增强了交错 TDI 影像边缘的锐利程度, 增加了影像的信息量.

3 结论

航空交错 TDI 红外影像具有高空间分辨率和高信噪比的优点. 但是奇偶行影像之间的灰度差异、

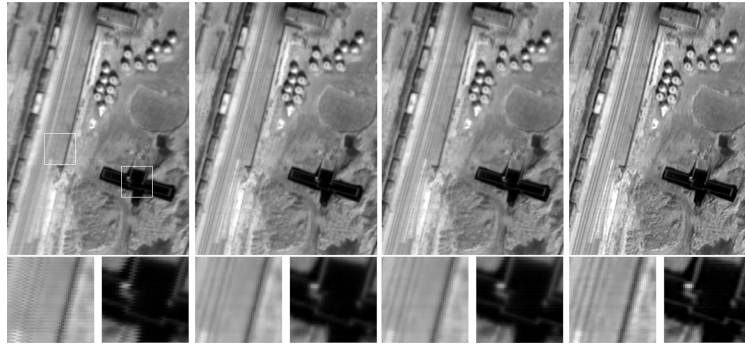


图 8 交错 TDI 红外影像复原

Fig. 8 Restoration of staggered TDI image

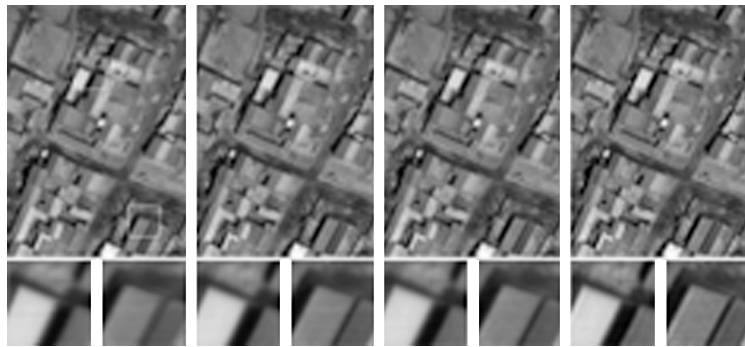


图 9 交错 TDI 红外影像复原

Fig. 9 Restoration of staggered TDI image

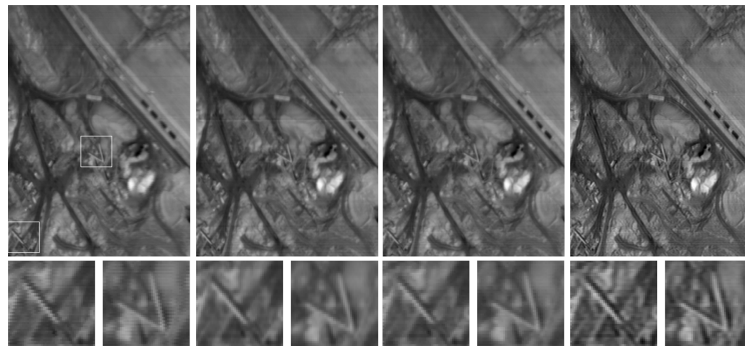


图 10 交错 TDI 红外影像复原

Fig. 10 Restoration of staggered TDI image

错动, 以及光学成像系统的降晰作用造成了影像质量的下降. 本文从这三个方面恢复影像. 实验结果表明, 本文方法能有效提高交错 TDI 红外影像质量, 增强影像的边缘和纹理结构, 有利于 TDI 红外影像在后续目标检测、信息提取等应用中发挥更大的作用.

References

- 1 Hochman G, Yitzhaky Y, Kopeika N S, Lauber Y, Citroen M, Stern A. Restoration of images captured by a staggered time delay and integration camera in the presence of mechanical vibrations. *Applied Optics*, 2004, **43**(22): 4345–4354
- 2 Zucker M, Pivnik I, Malkinson E, Haski J, Reiner T, Admon D, Keinan M, Yassen M, Sapir I, Sapir N, Fraenkel A. Long mid-wave infrared detector with time delayed integration. In: *Proceedings of the SPIE 4820, Infrared Technology and Applications XXVIII*. Seattle, WA: SPIE, 2003. 580
- 3 Fan Xiu-Ying, Bao Jin-He, Zhang Yong. Analysis on image sensor MTF of whiskbroom Scan TDI-CCD aerial camera. *Optical Technology*, 2012, **38**(5): 634–637 (范秀英, 鲍金河, 张勇. 摆扫式 TDI-CCD 航空相机传感器 MTF 分析. *光学技术*, 2012, **38**(5): 634–637)

- 4 Wang De-Jiang, Kuang Hai-Peng, Cai Xi-Chang, Liu Zhi-Ming, Zhang Xue-Fei. Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2465–2472
(王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 刘志明, 张雪菲. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2465–2472)
- 5 Yang Fei, Jin Guang, Qu Hong-Song, Yang Xiu-Bin, Xu Kai, Zhang Gui-Xiang. Design and analysis about rapid geometric correction of space whiskbroom time delayed and integration CCD camera. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 75–81
(杨飞, 金光, 曲宏松, 杨秀彬, 徐开, 张贵祥. 航天时间延迟积分 CCD 相机摆扫成像快速几何校正设计与分析. *光学学报*, 2014, **34**(1): 75–81)
- 6 Pan Sheng-Da, Lin Chang-Qing. Design of scanning imaging system based on 512×8 MW TDI IRFPA. *Infrared Technology*, 2013, **35**(2): 74–77
(潘胜达, 林长青. 512×8 中波 TDI 红外探测器成像系统设计. *红外技术*, 2013, **35**(2): 74–77)
- 7 Wang Hua, Wei Zhi-Yong, Zhang Wen-Yu, Wang Xu. Design of 480×6 infrared focal plane array signal processing circuit. *Infrared Technology*, 2009, **31**(9): 504–508
(王华, 魏志勇, 张文昱, 王旭. 480×6 红外探测器信号处理电路设计. *红外技术*, 2009, **31**(9): 504–508)
- 8 Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification. *Optical Engineering*, 1994, **33**(2): 566–578
- 9 Wang Z L, Li B, Zhang Y, Xiao H S, Zhou C H. Satellite vibration on image quality degradation of remote sensing camera. *Research on Precision Instrument and Machinery*, 2012, **1**(1): 6–10
- 10 Liang J, Xu T F, Ni G Q. Compensation with multi motion models for images from TDI-CCD aerial camera. In: Proceedings of the 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronic. Chengdu, China: IEEE, 2010. 1–5
- 11 Raiter S, Hadar O, Kopeika N S. Image restoration from camera vibration and object motion blur in infrared staggered time-delay and integration systems. *Optical Engineering*, 2003, **42**(11): 3253–3264
- 12 Avrin A, Stern A, Kopeika N S. Registration of motion-distorted interlaced images captured by a scanning vector imaging sensor. *Applied Optics*, 2006, **45**(23): 5950–5959
- 13 Yitahaky Y, Stern A. Restoration of interlaced images degraded by variable velocity motion. *Optical Engineering*, 2003, **42**(12): 2557–3565
- 14 Haik O, Yitzhaky Y. Superresolution reconstruction of a video captured by a vibrated time delay and integration camera. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, **15**(2): 023006
- 15 Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S, Burkitt T A. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*, 1994, **12**: 43–77
- 16 Brox T, Bruhn A, Papenberg N, Weickert J. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping. In: Proceedings of the 8th European Conference Computer Vision. Prague, Czech Republic: Springer, 2004. 25–36
- 17 Morgan G L K, Liu J G, Yan H S. Precise subpixel disparity measurement from very narrow baseline stereo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(9): 3424–3433
- 18 Yan H S, Liu J G. Robust sub-pixel disparity estimation and its refinement around depth discontinuity and featureless areas. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE, 2010. 4576–4579
- 19 Takita K, Aoki T, Sasaki Y, Higuchi T, Kobayashi K. High accuracy subpixel image registration based on phase only correlation. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2003, **E86-A**(8):1925–1934
- 20 Su Heng, Zhou Jie, Zhang Zhi-Hao. Survey of super-resolution image reconstruction methods. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1202–1213
(苏衡, 周杰, 张志浩. 超分辨率图像重建方法综述. *自动化学报*, 2013, **39**(8): 1202–1213)
- 21 Li Zhan, Zhang Qing-Feng, Meng Xiao-Hua, Liang Peng, Liu Yu-Bao. Super-resolution reconstruction for multi-resolution image sequence. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(11): 1804–1814
(李展, 张庆丰, 孟小华, 梁鹏, 刘玉葆. 多分辨率图像序列的超分辨率重建. *自动化学报*, 2012, **38**(11): 1804–1814)
- 22 An Yao-Zu, Lu Yao, Zhao Hong. An adaptive-regularized image super-resolution. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 601–608
(安耀祖, 陆耀, 赵红. 一种自适应正则化的图像超分辨率算法. *自动化学报*, 2012, **38**(4): 601–608)
- 23 Farsiu S, Robinson D, Elad M, Milanfar P. Fast and robust multi-frame super-resolution. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(10): 1327–1344
- 24 Farsiu S, Robinson D, Elad M, Milanfar P. Robust shift and add approach to super-resolution. In: Proceedings of the SPIE 5203, International Symposium on Optical Science and Technology. San Diego, CA: SPIE, 2003. 121–130



陈王丽 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生. 2008 年获中南大学测绘工程工学学士学位. 主要研究方向为遥感影像配准、复原、超分辨率重建.

E-mail: wlchen_85@163.com

(CHEN Wang-Li Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University. She received her bachelor degree from Central South University in 2008. Her research

interest covers image registration, restoration and super-resolution.)



孙涛 武汉大学电子信息学院教授. 2003 年获武汉大学工学博士学位. 主要研究方向为遥感影像处理, 环境建模, 计算机视觉. 本文通信作者.

E-mail: suntao@whu.edu.cn

(**SUN Tao** Professor at the Electronic Information School, Wuhan University. He received his Ph.D. degree of

computer science from Wuhan University in 2003. His research interest covers remote sensing image processing, environmental modeling, and computer vision. Corresponding author of this paper.)



秦前清 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室教授. 1989 年获南开大学理学博士学位. 主要研究方向为空间信息压缩与渐进传输, 影像超分辨率重建及多元数据协同处理.

E-mail: qqin@lmars.whu.edu.cn

(**QIN Qian-Qing** Professor at the State Key Laboratory of Information

Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University. He received his Ph.D. degree from Nankai University in 1989. His research interest covers spatial information compression and progressive transmission, image super-resolution reconstruction, and coopera-

tion processing of multivariate data.)

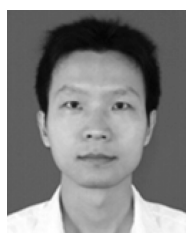


石强 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生. 2008 年获武汉大学工学学士学位, 2010 年获武汉大学工学硕士学位. 主要研究方向为多源遥感影像融合.

E-mail: sqfirstwhu@hotmail.com

(**SHI Qiang** Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Information

Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University. He received his bachelor degree from Wuhan University in 2008, and master degree in 2010, respectively. His research interest covers information fusion of multi-source remote sensing images.)



马国锐 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室副教授. 主要研究方向为变化检测, 目标识别与解译, 遥感成像机理与应用.

E-mail: mgr@whu.edu.cn

(**MA Guo-Rui** Associate professor at the State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Map-

ping and Remote Sensing, Wuhan University. His research interest covers change detection, target recognition and interpretation, mechanism and application of remote sensing images.)