

侧摆成像交错拼接时间延迟积分 CCD 搭接像元数的匹配设计

姜丽¹ 杨秀彬^{2,3} 王亚敏^{2,3,4} 苏畅^{2,3,4}

¹长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所星载一体化技术研究室, 吉林 长春 130033

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了实现卫星大侧摆成像时交错拼接时间延迟积分(TDI)CCD准确的重叠度配准和大幅宽无缝影像拼接,提出一种利用错位搭接像元移速度矢量之间的夹角计算最小搭接像元数目的方法。分析了卫星侧摆成像时像面像移速度矢量的变化,根据侧摆角度计算对应地物点的经纬度和合速度矢量;利用光线追迹和矢量映射等方法将合速度矢量通过成像的物像关系和地球曲率参数等投影至像面坐标系,计算出搭接像元移速度矢量之间的角度;结合 TDI CCD 位置矢量关系确立相邻两片 TDI CCD 的最少搭接像元数目。该算法成功应用到快舟一号卫星工程中,实验和理论对比分析发现,片间搭接像元的实际值和理论值有一个像元的偏差,在图像配准精度范围内。说明该方法能够有效消除卫星大侧摆成像对错位搭接像元拼接精度的影响。

关键词 成像系统; 时间延迟积分; 图像配准; 光线追迹; 侧摆

中图分类号 V443.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.051104

Matching Design About Pixel Number of Interleaving Assembly Time Delay Integration CCD for Lateral Swing Imaging

Jiang Li¹ Yang Xiubin^{2,3} Wang Yamin^{2,3,4} Su Chang^{2,3,4}

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Space Borne Integrated Research Laboratory, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

³ National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to realize the accurate superposition and seamless image assembly of interleaving assembly time delay integration (TDI) CCD imaging under the condition of large lateral swing space in spaceflight camera, it is mentioned in this paper that the number of the minimum overlap pixels can be calculated with the angle of image motion velocity vector among the dislocation lap joint pixels. First, velocity vector of ground object target in the coordinates of surface feature during satellite lateral swing imaging is analyzed. The velocity vector, latitude and longitude of harmony feature point are calculated using lateral swing angle. Then, the relationship of imaging and physical parameters have been projected to the image plane coordinates using the method of ray tracing and vector

收稿日期: 2015-11-16; **收到修改稿日期:** 2015-12-23; **网络出版日期:** 2016-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(11447232)

作者简介: 姜丽(1984—),女,博士,讲师,主要从事卫星成像模式设计和光子晶体方面的研究。

E-mail: jiangli08@mails.jlu.edu.cn

mapping. And then the angle between imaging velocity of overlap pixel has been calculated. Finally the least lap number pixel of two adjacent pieces TDI CCD is established by TDI CCD relationship. The algorithm is applied to the Fast Boat One satellite. By comparing the experimental and theoretical results, a deviation of pixels exists between actual and theoretical values in the image registration accuracy range. This method can effectively eliminate the large side swing imaging dislocation lap on pixel precision of stitching.

Key words imaging systems; time delay integration; image registration; ray tracing; lateral swing

OCIS codes 110.2970; 040.1520

1 引言

随着航天遥感信息产业对卫星成像的时间分辨率、空间分辨率和覆盖范围需求的提高,采用敏捷姿态控制系统配置大视场、高分辨率时间延迟积分(TDI)CCD相机的光学遥感小卫星成为国际上近年来高速发展的一类高性能卫星。为适应这一发展趋势,卫星采用一体化、轻量化、快速机动设计,在高分辨率相机焦平面上对多片 TDI CCD 进行交错拼接以实现大视场侧摆成像,使在轨卫星具有较大的成像幅宽和较强的机动能力^[1-3]。国际上主要的高分辨率卫星如 ALOS、IKONOS 和 Quick-Bird 等都采用了多片 TDI CCD 组合以加大角度机动的成像方式,实现高时间分辨率、高空间分辨率和大范围覆盖成像。

为实现大范围对地成像,卫星需要进行大角度的姿态机动,以快速改变遥感相机的对地指向,使 TDI CCD 相机实现对卫星当前轨道在地面投影区域两侧的一定区域进行推扫,从而增大卫星单轨的对地观测范围;与此同时,由于其轻量化长焦距设计和复杂的光学系统,高分辨率相机难以在焦平面中心线上形成一条严格意义上的线阵 CCD,而是以交错拼接的排布方式安装在与光学中心存在一定离轴角的偏视场处^[4-8]。在相机大侧摆成像过程中会导致交轨方向上交错拼接 CCD 搭接距离的几何变形,严重影响到交错拼接 CCD 像元数目的确定,导致交错拼接 CCD 之间的投影交叠或拼接处出现漏缝以及搭接像元数目重叠较多等情况。因此,光学相机焦平面的交错拼接 TDI CCD 之间需要进行一定像元数目的准确拼接。如果拼接过多,就会影响成像幅宽;如果拼接过少,就会出现图像拼接困难甚至相邻两片 CCD 之间漏缝等问题,严重影响 CCD 成像幅宽和重点目标点的提取。

针对交错拼接 TDI CCD 之间搭接像元数的配准方法,为保证各片 TDI CCD 之间的同源和拼接匹配性,采用将卫星遥感影像精确地投影到地面固定的参照系统中的技术,并从已知图像特征点出发进行图像匹配和图像融合,从而准确计算搭接像元存在的投影几何变形。王翀等^[9]利用大视场空间遥感相机的像速场计算了图像传感器的曝光积分;郭疆等^[10]计算了测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中的重叠像元数;吕恒毅等^[11]计算了测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中的重叠像元数和遥感相机焦面 CCD 机械拼接中的重叠像元数;常琳等^[12]采用确定第一图像和第二图像之间的拼缝的方法,对第一图像和第二图像的前景像素进行快速拼接;杨飞等^[13]根据单幅视野图像提取待拼接图中的特征信息,对待拼接图像进行二维小波变化,采用加权平均法来实现图像的融合,最终实现图像的准确拼接。文献[12-13]均通过分析下传条带图像之间的关系,然后根据图像特征进行后期的图像匹配与融合,最终实现拼接配准。现阶段国内外卫星交错拼接 TDI CCD 之间图像的搭接配准主要通过对两片 CCD 搭接像元之间的同名点匹配得到,需要对每一片 CCD 进行全部像素读取并进行匹配,这种方法耗费时间长,算法复杂。另外,未见针对卫星大侧摆成像时交错拼接 TDI CCD 之间图像搭接配准的方法介绍。

本文针对卫星侧摆成像过程中交错拼接 TDI CCD 由地球椭球曲率影响引起的交轨方向上搭接像元的不确定性,提出一种利用错位搭接像元像移速度矢量之间的夹角计算片间搭接像元数目的方法。该方法简化了配准计算过程,能够实现交错拼接 TDI CCD 的快速准确配准。

2 TDI CCD 之间失配像元数目的确定

在高分辨率相机中,难以在焦平面中心线上形成一条严格意义的线阵 CCD,而是将 CCD 以交错拼接的排布方式安装在与光学中心存在一定离轴角的偏视场处,如图 1 所示。而存在一定离轴角的交错拼接的 CCD 相机在星下点成像时,每片 CCD 的图像按照 CCD1 到 CCD4 的次序依次从左到右排列,从而得到与地物一致的相对位置关系。在拼接完成的图像中,CCD1 对应的图像位于最左侧,CCD4 对应的图像位于最右

侧,如图 2 所示。对于同一横向目标来说,CCD2、CCD4 先于 CCD1、CCD3 成像。在存在大侧摆的情况下,由于地球椭球曲率的影响,前后交错的 CCD 拼接处投影至地面会出现畸变,搭接处的曲率变化导致搭接距离增大,如图 3 所示。

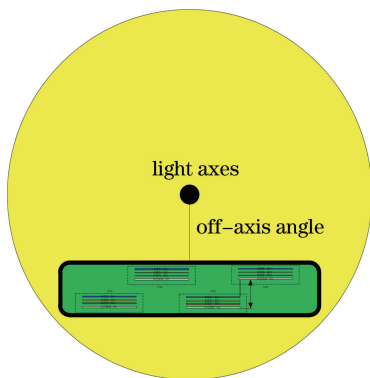


图 1 一定离轴角的交错拼接 TDI CCD 焦面示意图

Fig. 1 Focal plane schematic of interleaving assembly TDI CCD with certain off-axis angle

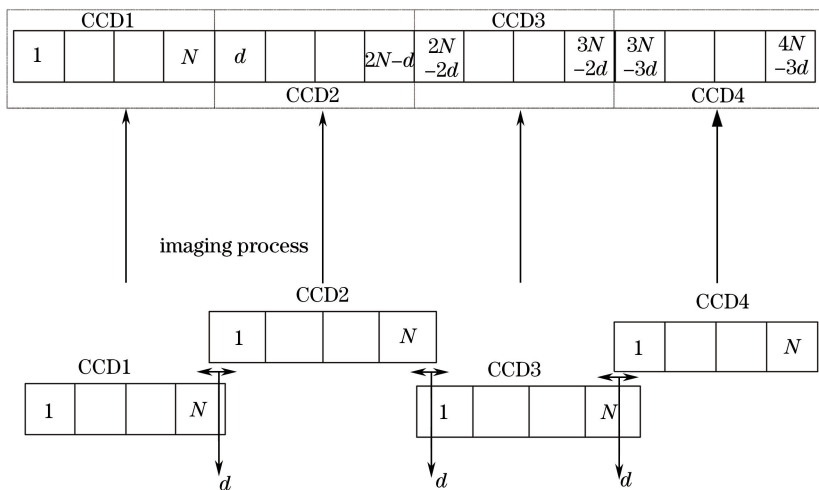


图 2 4 片交错拼接的 TDI CCD 成像拼接方法

Fig. 2 Splicing method of four pieces of interleaving assembly TDI CCD

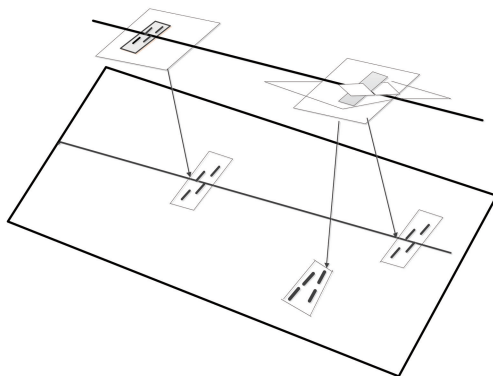


图 3 相机焦平面在星下点与侧摆成像时的物像对应关系

Fig. 3 Relationship between object and image of camera focal plane at nadir and lateral swing imaging

TDI CCD 结构上是面阵 CCD,而功能上却是线阵 CCD,包含 $M \times N$ 个像元, M 和 N 分别代表积分级数和垂直相机扫描方向上的像元个数。当沿着 TDI CCD 级数方向推扫成像时, M 级像元积分相当于同一列像元在 M 个行周期内对同一景物积分,增加了有效积分时间,TDI CCD 收集的信号增加了 M 倍。与普通线阵 CCD 相比,TDI CCD 的这种工作方式要求同一列上的每一个像元都对同一目标曝光积分,即 TDI

CCD 的行扫描速率与目标点景物的移动速率要严格同步,这样才能保证成像质量。当 TDI CCD 的行扫描方向与像移速度矢量存在一定夹角 $\Delta\psi$ 时,交错拼接的两片 TDI CCD 对应的搭接像元就无法对同一景物点进行成像。

在卫星侧摆成像过程中,除了存在错位搭接 TDI CCD 像元像移速度矢量之间的夹角 β 外,还存在卫星偏航方向上的偏航角控制误差以及相机与焦平面在偏航方向上的装调误差 $\Delta\beta$,这些角度的偏差直接导致像移速度矢量的方向与 TDI CCD 积分方向的失配,如图 4 所示。因此,极限误差角 $\Delta\psi = \beta + \Delta\beta$ 。

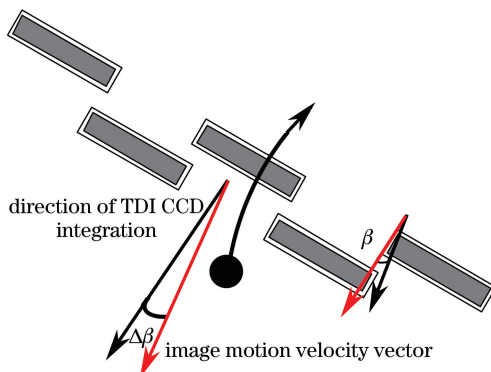


图 4 像移速度矢量方向与 TDI CCD 积分方向的关系示意图

Fig. 4 Relationship between image motion velocity vector and TDI CCD integration direction

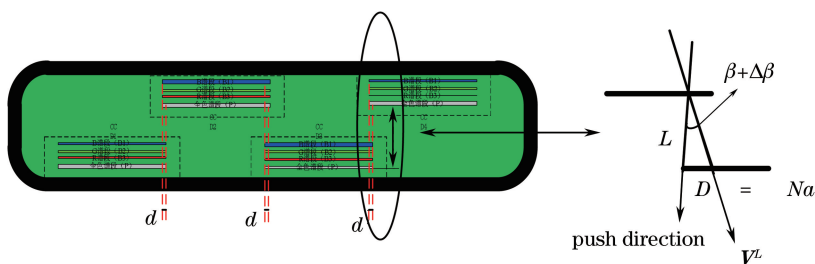


图 5 4 片 TDI CCD 拼接位置关系图

Fig. 5 Diagram of four pieces of TDI CCD splicing location

4 片交错拼接 TDI CCD 的安装示意图如图 5 所示,由于焦平面上各个像元存在像移速度矢量的失配,从而导致成像时交错拼接的上下片 TDI CCD 搭接像元数目出现漏缝或重叠过多的现象,该偏差主要是由推扫像移速度矢量与 TDI CCD 积分方向失配的极限误差角 $\Delta\psi$ 导致的,TDI CCD 之间搭接失配像元数目 N 的计算公式如下:

$$N = L \times \tan(\Delta\psi) / a, \quad (1)$$

式中 L 为片间距离, a 为 TDI CCD 像元尺寸。

3 地物速度矢量在像面坐标系下的夹角

卫星侧摆成像后,相机焦平面上各像元像移速度矢量发生很大变化。首先需要确定卫星侧摆成像时指向地物点的经纬度,利用地球自转速度和卫星前进速度等数据,将侧摆成像地物点的合速度矢量利用光线追迹和矢量映射等方法投影至像面坐标系,再计算搭接像元间像移速度矢量,最后求解片间搭接像点的像移速度矢量之间的夹角。

3.1 像面速度矢量变化量分析

当航天相机进行侧摆成像时,由于地球椭球曲率的存在,焦平面上的交错拼接 TDI CCD 投影至地面上,导致多片 TDI CCD 拼接后生成的图像在幅宽方向上错开一定的位置,并产生投影变形,最终导致拼接的各片 TDI CCD 之间的像移速度也不同。当卫星相机大侧摆成像时,地面成像目标区域为梯形,较之于卫星星下点推扫成像对应的像移速度矢量与积分方向相同,侧摆成像对应的焦平面上像移速度矢量随地球曲率变

化将发生很大变化,具体的对应关系如图 6 所示, $A_1B_1C_1D_1$, $A_2B_2C_2D_2$ 和 $A'_2B'_2C'_2D'_2$ 分别是相机焦平面、侧摆成像对应的目标区域以及侧摆成像速度矢量在焦平面上的投影。焦面上 TDI CCD 的积分方向与目标景物推扫速度方向相反,由物像对应关系可知,焦平面上像移速度矢量方向与相机推扫方向保持一致。侧摆成像时地面景物移动速度大小不同,焦平面上像移速度矢量方向和大小产生如图 6 所示变化,因此各片 TDI CCD 像移速度矢量不同,行转移时间不同,导致经过一定积分时间后,同一目标区成像拼接像元对应位置将发生横向错位或重叠。因此,交错拼接 CCD 搭接最小像元数目可以依据 TDI CCD 焦平面位置矢量和搭接像元像移速度矢量夹角之间的关系计算得到。

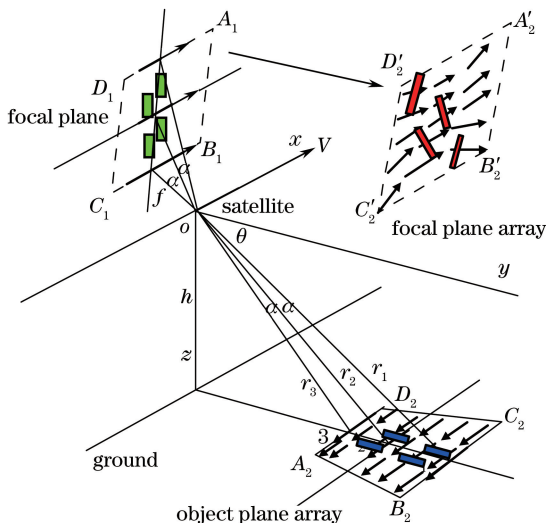


图 6 侧摆成像像移对应关系图

Fig. 6 Image motion relationship of lateral swing imaging

3.2 侧摆成像地物点的经纬度计算

卫星对星下点进行成像时,相机焦平面对地稳定,相应的星下点经纬度可以通过全球定位系统(GPS)信息求得。当卫星进行大侧摆成像时,根据相关几何关系(图 7),将地球近似为圆球体, O 为地球球心,设时刻 t 卫星位置为 S , A 为星下点,过 A 点作线段 AO 的垂线交赤道平面于 C ,连接 OC 。 B 为赤道与卫星轨道面的交点,则平面 BOC 为赤道面,平面 AOB 为卫星轨道面,平面 AOC 为时刻 t 时遥感器侧视面。从 A 点向赤道平面作垂线 AD 得垂足 D ,从 D 点依次作 OB 和 OC 的垂线,垂足分别为 E 和 F 。过 B 作 SO 的垂线得垂足 G ,侧视面内偏离 SO 角度 θ 并与地球表面交于点 R , R 点的经纬度坐标为 (λ_R, φ_R) 。作 RR' 垂直于赤道面,并作 $R'H$ 垂直于 OC 。得到 $OE \perp AD$, $OE \perp ED$, $OE \perp$ 平面 AED ; $\angle AED = i$ 为卫星的轨道倾角,

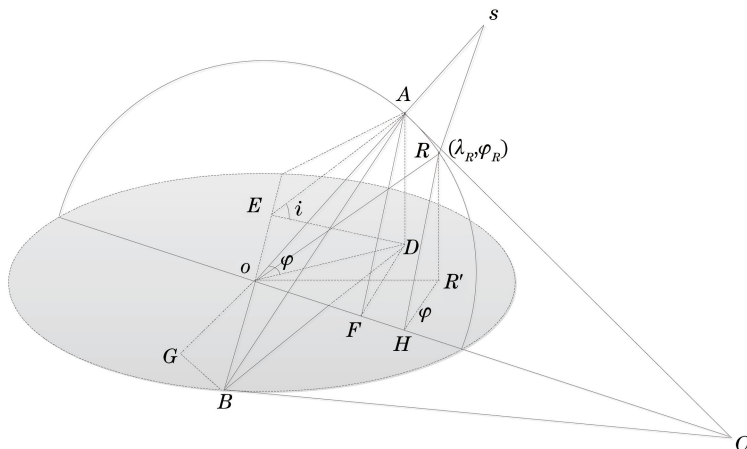


图 7 卫星侧摆成像几何关系示意图

Fig. 7 Schematic imaging geometry with satellite lateral swing imaging

$\angle AOD = \varphi, \angle RSA = \theta$, 设地球半径为 r , 卫星轨道高度为 h , 则对应的经纬度为

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_R = \arcsin \left\{ \frac{\sin \left\{ \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{1 - \sin^2 i + \sin^2 \varphi}} - \arcsin [(1 + h/r) \cdot \sin \theta] + \theta \right\}}{\sqrt{1 - \sin^2 i + \sin^2 \varphi}} \right\} \\ \lambda_R = \lambda - [\arccos(\cos \angle AOC / \cos \varphi) - \arccos(\cos \angle ROC / \cos \varphi_R)] \end{array} \right. \quad (2)$$

3.3 地物点合速度矢量计算

卫星侧摆成像时, 对应地物点的速度由两个分量组成, 一个是由卫星的轨道运动导致的进动速度, 另一个是由地球自旋运动引起的与经线同向的切向速度。当卫星侧摆 φ_0 角度, 视场角为 η_i 时, 视轴指向景物处的合速度矢量 \mathbf{V}^L 计算如下:

$$\mathbf{V}^L = \mathbf{V}_s^L + \mathbf{V}_e^L, \mathbf{V}_s^L = \boldsymbol{\Omega} [(r + h) - \cos \varphi_i L], \mathbf{V}_e^L = \boldsymbol{\omega} \cdot r \cdot \cos \lambda_g, \quad (3)$$

$$L = (r + h) \times \cos \varphi_i - [r^2 - (r + h)^2 \times \sin^2 \varphi_i]^{1/2}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{V}_s^L 为卫星的轨道运动产生的沿推扫方向的地速, \mathbf{V}_e^L 为地球自转运动在景物处产生的与经线同向的切向速度, $\varphi_i = \varphi_0 + \eta_i$, $\boldsymbol{\Omega}$ 为轨道进行角速度, $\boldsymbol{\omega}$ 为地球自转角速度, L 为卫星与地物点的距离, λ_g 为地物点纬度。

3.4 地物点速度矢量在像面坐标系的矢量映射

地物点合速度矢量的光线追迹是在像面坐标系内对地物点速度矢量进行观测时光线方向和速度的确定。从地物坐标系到像面坐标系需要经过矢量映射计算由 P 点发出的速度矢量 \mathbf{V} 经过矢量映射最终到达像面上的速度矢量。

地物坐标系下的速度矢量 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1; \mathbf{V}_2; \mathbf{V}_3]$, 其中 $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_s^L + \mathbf{V}_e^L \cos \alpha$, $\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_e^L \sin \alpha$, $\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_e^L \sin \alpha \cos \gamma$ 。

矢量映射至像面坐标系的变化关系如下:

$$\mathbf{V}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{p1} \\ \mathbf{V}_{p2} \\ \mathbf{V}_{p3} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{L \times \cos \eta_i} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{f}{L \times \cos \eta_i} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

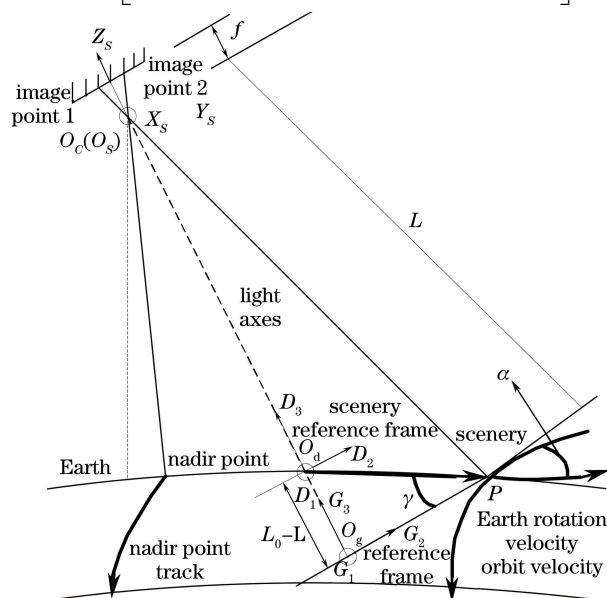


图 8 侧摆成像等效光路图

Fig. 8 Equivalent optical path with lateral swing imaging

通过坐标变换即可得到像面上片间搭接像点的像移速度矢量 \mathbf{V}_p , 进而可以通过 $\beta = \arctan(\mathbf{V}_{p2}/\mathbf{V}_{p1})$ 求解片间搭接像点的像移速度矢量之间的夹角 β 。

4 理论计算与验证

2013年11月,利用快舟一号卫星进行了星下点和大侧摆成像在轨实验,以验证交错拼接 TDI CCD 相机搭接像元数匹配设计的正确性。表1为快舟一号卫星星下点和大侧摆成像条件下两片交错拼接 TDI CCD 搭接像元数的理论值与在轨成像搭接像元数的实测值,其中相机焦平面相邻两片交错拼接 TDI CCD 理论搭接像元数为50个。卫星进行侧摆角成像后,对下传的相邻两片影像辅助数据按照(1)式计算出失配像元数目,同时对两片交错拼接 TDI CCD 影像进行手工拼接得出实际片间搭接像元数目,TDI CCD 的像元尺寸 $a = 8.75 \mu\text{m}$,交错拼接的 TDI CCD 间距 $L = 23 \text{ mm}$ 。结果显示:侧摆 1° 成像极限误差角偏差 $3'$,错位像元数目为2.29个,计算片间搭接像元48个,实测片间搭接像元47个(图9);侧摆 22° 成像极限误差角偏差 $6.5'$,错位像元数目为4.97个,计算片间搭接像元45个,实测片间搭接像元44个(图10);侧摆 34° 成像极限误差角偏差 $10.5'$,错位像元数目为8.02个,计算片间搭接像元42个,实测片间搭接像元42个(图11)。经过实验和理论对比分析发现,片间搭接的实际值和理论值有一个像元的偏差,现有阶段两张图像的配准基本在一个像素以内,这一偏差在图像拼接配准精度范围内。

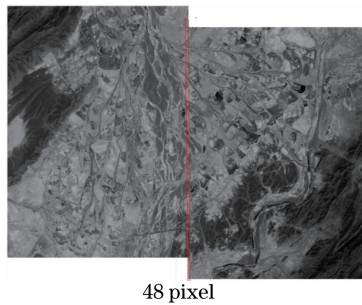


图9 侧摆 1° 对巴基斯坦进行成像

Fig. 9 Pakistan image with lateral swing 1°

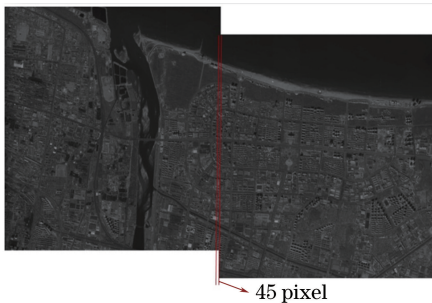


图10 侧摆 22° 对大连进行成像

Fig. 10 Dalian image with lateral swing 22°

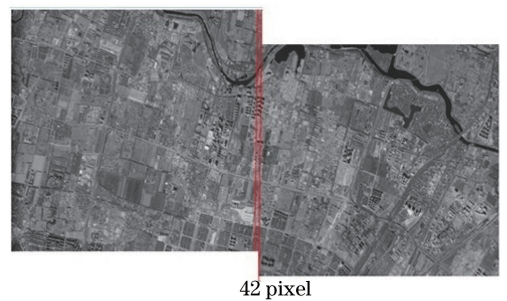


图11 侧摆 34° 对北京进行成像

Fig. 11 Beijing image with lateral swing 34°

表1 不同侧摆角度下的交错拼接 TDI CCD 搭接像元数

Table 1 Overlap pixel of interleaving assembly TDI CCD with different lateral swing angles

| Place | Lateral swing angle / ($^\circ$) | Limit error angle / ($'$) | Dislocation pixel | Test pixel |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------|
| Pakistan | 1 | 3 | 2 | 47 |
| Dalian | 22 | 6.5 | 5 | 44 |
| Beijing | 34 | 10.5 | 8 | 42 |

根据表1数据可知,卫星偏航角控制误差以及相机与焦平面在偏航方向上的装调误差等偏航角误差为固定值,引起的错位像元数目为定值。卫星在星下点成像时,交错拼接 TDI CCD 在交轨方向上的搭接距离

无几何变形,没有产生错位像元。当卫星进行大侧摆成像时,交错拼接 TDI CCD 在交轨方向上的搭接距离几何变形量随侧摆角度的增大而增加。因此,卫星侧摆成像角度越大,两片交错拼接 TDI CCD 之间的影像需要搭接的像元数目就越多。

5 结 论

根据卫星侧摆成像物像关系和焦平面 TDI CCD 位置矢量,利用光线追迹和矢量映射等方法分析了卫星侧摆成像时像面像移速度矢量的变化,准确计算出相邻两片 TDI CCD 的最少搭接像元数目。该算法成功应用到快舟一号卫星工程中,实验显示,卫星对沿星下点轨迹两侧分布的广大区域内的重点目标影像进行了快速获取,并实现了卫星大侧摆成像时交错拼接 TDI CCD 影像之间的准确配准。利用该算法获取的配准图像在应急自然灾害监测和灾情评估、突发事件、矿产资源使用监测、土地使用情况调查等方面均得到了成功应用。

参 考 文 献

- 1 Jean J, Eric J, Gerard L, *et al.*. Attitude guidance techniques developed in CHES for each observation and scientific missions[C]. The 28th Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, 2005: 11-16.
- 2 Peter L, Boussarie E, Lachiver J M, *et al.*. The Pleiades system high resolution optical satellite and its performance[C]. The 53rd International Astronautical Congress-The World Space Congress, Houston, 2002.
- 3 Cazaux Y, Subiela D, Boucharlat G. 12000-pixel monolithic linear sensor for high-resolution push-broom earth observation satellites[C]. Advanced and Next Generation Satellites Hiroyuki Fujisada, Paris, 1995, 25(3): 430-439.
- 4 Li Chaohui, Wang Zhaoxun, Wu Keyong. Optical assembly of CCD focal plane for space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 213-216.
李朝辉, 王肇勋, 武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 213-216.
- 5 Yang Hua, Guo Yue, Fu Ruimin. Study on field butting of TDI CCD[J]. Optical Technique, 2003, 29(2): 226-228.
杨 桦, 郭 悦, 伏瑞敏. TDI CCD 的视场拼接[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 226-228.
- 6 Shi Lei, Jin Guang, An Yuan, *et al.*. Research on a mechanical interleaving stitching method of CCDs for remote sensing camera[J]. Infrared, 2009, 30(1): 12-15.
史 磊, 金 光, 安 源, 等. 一种遥感相机的 CCD 交错拼接方法研究[J]. 红外, 2009, 30(1): 12-15.
- 7 Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical interleaving assembly of TDI CCD focal plane[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 740-745.
张星祥, 任建岳. TDI CCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 740-745.
- 8 Jia Xuezhi, Zhang Lei, An Yuan, *et al.*. Design and experiment of focal plane for high speed TDI CCD space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0823004.
贾学志, 张 雷, 安 源, 等. 高速 TDI CCD 空间相机焦平面设计及实验[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0823004.
- 9 Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, *et al.*. Image motion velocity field for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0511002.
王 翀, 尤 政, 邢 飞, 等. 大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511002.
- 10 Guo Jiang, Gong Dapeng, Zhu Lei, *et al.*. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1251-1257.
郭 疆, 龚大鹏, 朱 磊, 等. 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1251-1257.
- 11 Lü Hengyi, Liu Yang, Guo Yongfei. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1041-1047.
吕恒毅, 刘 杨, 郭永飞. 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(5): 1041-1047.
- 12 Chang Lin, Jin Guang, Yang Xiubin. Fast registration algorithm design and analysis of TDI CCD camera assembly imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511001.
常 琳, 金 光, 杨秀彬. 航天 TDI CCD 相机成像拼接快速配准算法设计与分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5):

0511001.

- 13 Yang Fei, Jin Guang, Qu Hongsong, *et al.*. Design and analysis about rapid geometric correction of space whiskbroom time delayed and integration CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111001.

杨 飞, 金 光, 曲宏松, 等. 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[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0111001.