



论 文

星载焦面视场拼接 TDI CCD 相机成像质量及处理方法分析

龙小祥*, 王小燕, 钟惠敏

① 中国资源卫星应用中心, 北京 100094

* 通信作者. E-mail: hustlxx@tom.com

收稿日期: 2011-06-05; 接受日期: 2011-09-09

摘要 本文分析卫星偏航角、相机积分时间、平台稳定性、姿轨误差对焦平面线阵采用视场拼接的 TDI 相机地面成像的影响, 包括线阵、沿轨两个方向上的错位 (点上的变化) 与地面扫描轨迹方向上的影像畸变 (线上的变化). 针对 CBERS-02B HR 相机的卫星影像, 研究地面解决偏航角引起图像错位的数据处理方法——基于地面影像的图像配准仿射变换纠正法. 根据 CBERS-02B HR 线阵的地面配准试验, 分析出了 CBERS-02B 卫星星上偏航角补偿精度与误差对图像质量的影响, 及影像畸变产生的原因.

关键词 TDI CCD 相机 偏航角 视场拼接 图像配准

1 引言

TDI CCD(时间延时积分电荷耦合器件) 是一种采用面阵结构—线阵输出的 CCD 器件, 能以 TDI 成像方式对地物多次曝光, 增加积分时间, 成倍地提升系统光谱能量的采集能力, 其具有辐射灵敏度高、信噪比高的特点, 正逐步取代常规 CCD 器件成为对地观测高分辨率相机的主流传感器 [1].

为满足用户要求获得高分辨率影像的同时保证一定幅宽, 在焦距一定的情况下, 空间相机需要设计一个大的视场. 为解决单片 TDI CCD 的像元个数限制问题, 载荷研制方需要将多片 TDI CCD 阵列拼接起来以获得较大的成像视场. 然而, 由于每片 TDI CCD 均独立构成一个小面阵, 受器件外形、安装等因素的影响, 多片 TDI CCD 无法在焦平面上按照一条直线排列构成一个线阵. 通常情况下采用多片非共线方式进行成像. 目前, IKONOS, QuickBird, EROS-B1, OrbView-3 等高分辨率商业卫星以及 CBERS-02B 等卫星的高分光学相机都采用了这种非共线 TDI CCD 焦平面设计 [2]. CBERS-02B HR 相机是目前国产高分辨率星载相机的典型代表之一.

CBERS-02B HR 相机由 3 片 TDI CCD 在焦平面上视场拼而成, 线阵方向为 X 向, 线阵法向为 Y 向. TDI CCD 相机光学设计视场为 $2\omega = 2.16^\circ$, 由于 Y 方向偏场使用, 有效视场为上半部分中圆冠的部分, 3 片 TDI CCD 在有效视场中进行视场拼接, 每片 TDI CCD 有 4096 个像元, 每个像元 0.01 mm, 如果在线阵方向上首尾相接不考虑重叠, 拼接后线视场长度为 122.88 mm. 实际设计每片 CCD 重叠 21 个像元, 成像 CCD 线阵长度为 122.46 mm. 拼接情况见图 1.

引用格式: 龙小祥, 王小燕, 钟惠敏. 星载焦面视场拼接 TDI CCD 相机成像质量及处理方法分析. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(增刊): 19-31

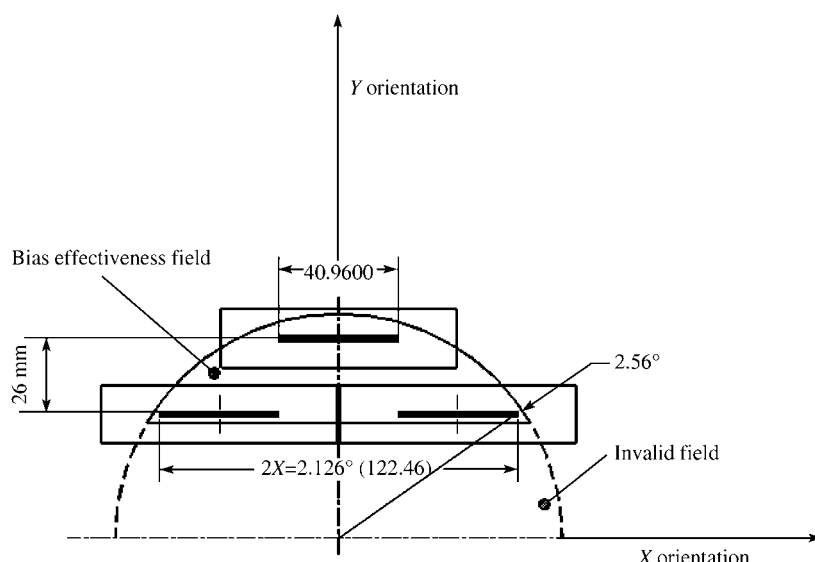


图 1 HR 相机的焦平面示意图

Figure 1 Rough sketch for HR camera focal plane

The left is CCD A1; the middle is CCD A2; the right is CCD A3

但这种非共线的 TDI CCD 相机成像机理会给地面成像的质量及高精度的几何处理方法带来新的问题^[3]. 非共线 TDI CCD 相机成像时所获取的原始数据是按照每片 TDI CCD 单独成像并记录的, 受传感器视场摆放位置、偏流角控制偏差、地形起伏、行积分时间变化等因素的影响, 无法直接构成一个完整的扫描影像, 需要对数据进行高精度视场拼接构成一副完整无缝影像.

2 焦面视场拼接 TDI 相机成像特性分析

对于单片 TDI CCD 可以等效视为普通的单线阵 CCD, 在对地面目标推扫成像的每个行积分时间周期内, 沿轨道飞行方向上近似为平行投影, 在扫描行方向上遵循严格的中心投影几何关系^[4].

相机沿轨推扫成像时, 在焦平面上按品字形排列的 3 片 TDI CCD 共有一套轨道姿态、相机安装角、焦距和主点参数, 如图 2 所示. 将 3 片 TDI CCD 获取的影像按成像时间 (行计数) 对齐后即构成原始影像^[5].

TDI CCD 要求 CCD 的行扫描速率与像移速度相匹配, 在焦距固定的条件下, 像移速度与卫星相对地面速度和轨道高度有关. 因此每行成像时间并不是一个固定值, 在成像时需要根据计算调整“积分时间”(成像时间). 另一点与普通线阵 CCD 不同的是, 由于地球的自转、航天器姿态的偏航会造成成像推扫方向与 CCD 器件的列方向不重合, 两者之间的夹角称为偏流角. 根据延时积分的工作原理, 这会造成积分景物的横向错位, 影响图像的清晰度. 因此必须把 TDI CCD 在焦平面内旋转一个角度, 使得推扫方向和 CCD 器件的列方向重合. 偏流角的计算和补偿一般在星上自动进行, 其补偿偏流角的大小下传到地面, 并在几何校正时参与几何投影计算.

星上积分时间的控制以及偏流角补偿的精度会影响 CCD 成像的清晰度. 需要注意的是由于积分时间不固定, 因此需要下传数据中给出对应的积分时间, 以确定每行图像数据对应的成像时间. 补偿的偏流角包含在姿态偏航角中下传.

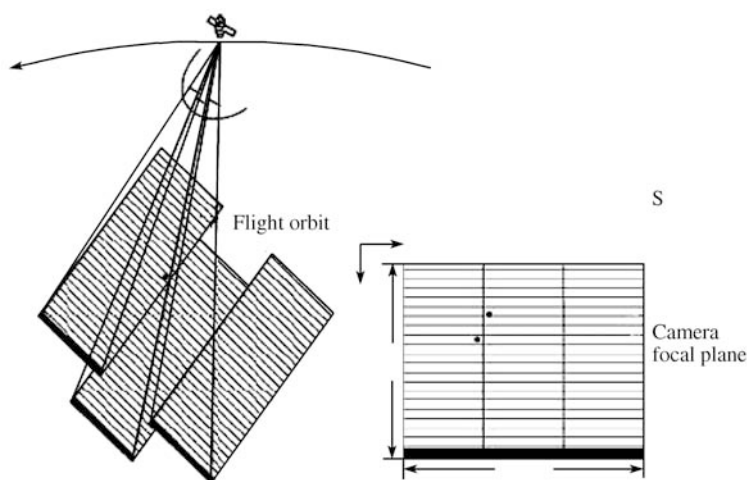


图 2 HR 相机推扫成像模式和原始影像坐标系示意图

Figure 2 The model of HR camera push broom and original photograph coordinate

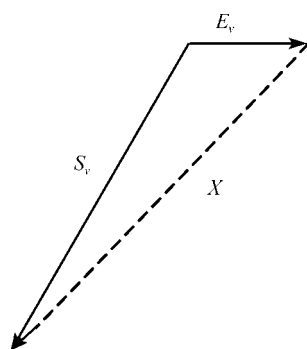


图 3 卫星速度与偏流角

Figure 3 The velocity and crab angle of satellite

偏流角大小实际上是卫星绝对速度 S_v 与卫星对地速度 X 的夹角. 卫星对地速度 X 为卫星星下点绝对速度 S_v 与地球旋转速度 E_v 的矢量和, 其中 $E_v = (H_{\text{sat}} + R_{\text{earth}}) \cdot \omega_{\text{earth}}$. H_{sat} 为卫星轨道高度, R_{earth} 为地球地面到地心距离, 见图 3.

由于卫星随地球旋转的速度由高纬到低纬连续增大, 所以偏流角在赤道处达到最大值. 如果不进行偏流角校正, 则会由于地球自转, 造成扫描行西移, 使卫星影像呈平行四边形的偏斜现象, 也叫卫星影像偏斜. 对于单线阵 CCD 相机, 不进行偏流角校正可以的, 但对于成品字形排列的 TDI CCD 类型的 HR 相机, 则必须进行偏流角校正. 如果不进行偏流角校正会造成两个伤害: 1) 由于视场拼接的原因, 会造成地面图像漏扫; 2) 影响 CCD 成像的清晰度.

下面对影响 3 片 TDI CCD 成像数据片间偏移特性的各种因素展开分析.

2.1 偏航角对地面成像的影响

对于星载 TDI CCD 相机, 为使 TDI CCD 线阵推扫方向与目标像移方向一致, 实现光生电荷包

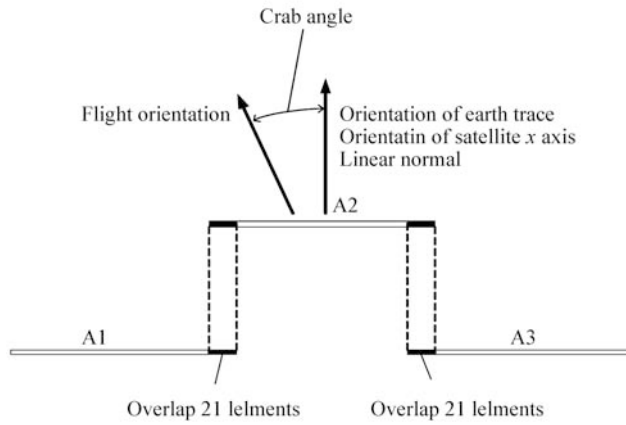


图 4 偏流角校正后线阵方向关系

Figure 4 Linear array direction of adjust crab angle

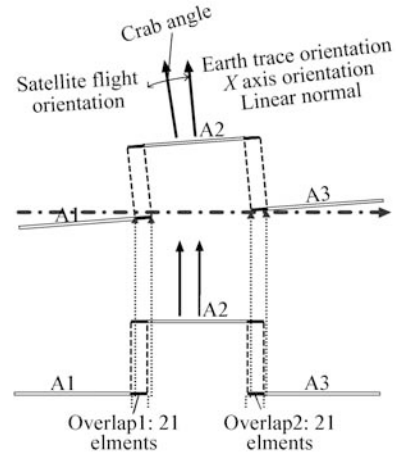


图 5 偏流角引起片间地面轨迹方向上畸变

Figure 5 Crab angle create the distortion of earth track direction

转移速度与目标像移速度的匹配以确保成像质量, 需要对偏流角引起的像移进行补偿. 目前, 基于偏流角的大小对卫星进行偏航控制是较为常用的一种方法. 如图 3 所示, 假设卫星轨道由北向南, 在某一时刻, 卫星飞行的速度为 V_1 , 相对于地球自转的速度为 V_2 , 那么被摄目标的速度 V 是 V_1 与 V_2 的和, V_1 与 V 的夹角即为偏流角 (β_p), 通过卫星偏航控制来补偿偏流角所导致的 TDI 像移, 只需要将卫星绕轨道坐标系的 Z 轴旋转角度 β_p 即可 [6].

当偏流角控制无偏差时, TDI CCD 线阵在地面上的投影线与目标移动方向具有垂直关系, 基于焦平面传感器与地面投影的空间相似关系, 相邻影像水平偏移量与相邻 TDI CCD 的探元重叠个数最为吻合. 设计上, 为了得到对地面的连续影像, 需要偏流角补偿误差至少小于 $\arctan(21/2600)=0.46^\circ$. 偏流角校正后线阵方向关系见图 4.

当偏流角控制存在偏差时, TDI CCD 的行间转移方向与目标移动方向不一致, 此时目标移动方向与 CCD 线阵的地面投影线不垂直, 单片 TDI CCD 成像的地面覆盖形状也将产生扭曲, 进而影响片间水平重叠关系. 假定当 TDI CCD 行间转移方向位于目标移动方向的右侧时, 偏流角控制偏差 γ 为正, 否则为负. $olap_L$ 为 A1 和 A2 在相机焦平面上视场重叠的像元个数设计值, d 为 A1 和 A2 的垂直间距, p 为 CCD 探元尺寸, 可由以下公式估算 A1 和 A2 影像的水平偏移量 dx_L [7], $dx_L = olap_L + (d \cdot \tan \gamma) / p$.

如图 5 所示图像的 A2 片与 A1, A3 之间分别错开的像元数会相应发生变化, 不仅会引起图像片间拼接时 A2 片与 A1 片间上下错位数和 A2 片与 A3 片间上下错位数的不一致 (点上的变化), 还会引起图像地面轨迹方向上的畸变 (片间重叠区域扫描地面轨迹长度变化、线的变化).

偏流角修正误差设计指标为 $0.3^\circ (3\sigma)$, 当为最大值时, 重叠区域 1 重叠像元数为 7.4 个像元: $21 \text{ pixel} - \tan(0.3^\circ) \times 26 \text{ mm} = 7.4 \text{ pixel}$, 重叠区域 2 重叠像元数为 34.6 个像元: $21 \text{ pixel} + \tan(0.3^\circ) \times 26 \text{ mm} = 34.6 \text{ pixel}$.

2.2 积分时间对地面成像的影响

为了保证成像清晰度, TDI 方向的电荷转移速度应该与像面速度 V_p 同步 [8]. 需要满足关系式

$V_p \times T_s = p(T_s$ 为行积分时间, p 为 CCD 像元几何尺寸)^[9].

$$\text{GSD} = V_G \times T_s = p \times \frac{H}{f}, \quad (1)$$

$$V_P = \frac{V_G}{H} f, \quad (2)$$

式中, V_G 为星下点速度, H 为卫星平台轨道高度, f 为相机焦距, GSD 为像元分辨率.

因此, $T_s = \frac{p}{V_p} = \frac{p \times H}{V_G \times f}$. 由此可见, 行积分时间 T_s 与卫星的速高比 V_G/H 有关^[9], 飞行器的轨道速度 V_H 与 V_G 的关系式如下^[10]:

$$V_G = V_H \times \frac{R_e}{R_e + H} = \sqrt{\frac{G \times M_e}{R_e + H}} \times \frac{R_e}{R_e + H}, \quad (3)$$

$$T_s = \frac{p}{V_p} = \frac{p \times H}{\sqrt{\frac{G \times M_e}{R_e + H}} \times \frac{R_e}{R_e + H} \times f} = \frac{p \times H \times (R_e + H)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{G \times M_e} \times R_e \times f}. \quad (4)$$

不考虑地形起伏的影响, 假设相机对星下点成像, 若行积分时间周期为 T_1 , A1 和 A2 对某物点成像的垂直偏移量为 dy_{L1} , A2 对该物点成像后, 经时间延迟 Δt_1 , A1 再对该物点成像, 有 $\Delta t_1 = dy_{L1} \times T_1$; 若行积分时间为 T_2 , 此时垂直偏移量为 dy_{L2} , 那么对物点的成像时间延迟 $\Delta t_2 = dy_{L2} \times T_2$. 由于相邻 TDI CCD 的成像时间延迟是近似相等的, 有 $\Delta t_1 \approx \Delta t_2$ ^[11], 于是

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{dy_{L1}}{dy_{L2}}, \quad \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{dy_{L2} - dy_{L1}}{dy_{L2}}. \quad (5)$$

因此, 不同行积分时间周期情况下, 相邻 TDI CCD 影像垂直偏移量的整体差值 ΔL . 当行积分时间增大时, 垂直偏移量会减少, 反之, 偏移量会变大. 此外, 当行积分产生跳变时, 垂直偏移量将存在一个渐变阶段. 假定从 t_s 时刻开始成像, 到 t_e 时刻结束, 在 t 时刻 3 片 TDI CCD 的行积分时间从 T_1 变为 T_2 . 由于 A1(或 A3) 与 A2 对同一目标成像的时间延迟与相邻 TDI CCD 的行积分时间均有关, 令 t 时刻 A2 的地面投影与 t' 时刻 A1(A3) 的地面投影有重叠压盖, 由于在 (t, t') 时段内, A1(A3) 的行积分时间 T_2 与之前 A2 对相同地面目标成像时的行积分时间 T_1 不同, 因此片间垂直偏移量是渐变的^[12].

对于 CBERS-02B HR 相机, 3 片 TDI CCD 的行积分时间调整具有同步性, 卫星平台大约每十几秒对行积分时间调整一次, 变化幅度大约为 $0.667 \mu\text{s}$, 在行积分时间跳变的一个周期内, 片间垂直偏移量将整体变化 5–6 个像素, 且存在一个线性过渡阶段^[13].

2.3 姿态误差的影响

由于 TDI CCD 特殊的工作方式, 一方面需要依据星下点运动或目标的经纬度计算和调整偏流角, 另一方面需要电荷包的行转移周期与像元运动相匹配. 3 片非共线 TDI CCD 的片间偏移特性与成像时的姿态角密切相关. 实际上, 由于多种因素的存在, 这两种要求会受到各种工程误差的影响, 包括星体陀螺及飞轮等的高频振动在星体结构上的传递、太阳能帆板的低频振动传递及姿态传感器与相机的安装偏差、姿态和轨道的误差等^[14]. 例如, 若侧摆角测量值存在误差, 将导致偏流角计算偏离其理想值, 从而影响片间水平偏移量. 根据每相邻两片 TDI CCD 影像之间垂直偏移量受相机侧摆的影响特点, 相机侧摆幅度越大, 对姿态控制的稳定性要求越高. 对于 HR 相机, 大约每 0.022° 的偏流角控制

偏差就会带来一个像素的水平偏移量变化, 而根据偏流角控制的基本原理可知, 相机侧摆或俯仰控制的可靠性也会给偏流角计算和补偿带来一定的影响^[15].

在卫星飞行过程中, 当姿态测量精度高时, 偏流角校正的精度会比较高, 从而图像片间地面轨迹方向上的畸变也会比较小甚至不会出现; 当卫星突然发生抖动或是其他因素影响姿态测量误差较大时, 引起的畸变也比较大.

2.4 小结

综上所述, 由于平台姿态控制与轨道计算精度引入偏航角校正误差、积分时间计算和引入存在误差, 使得地面图像在搭接区域扫描过的区域存在轨迹变化, 无法直接构成一个完整的扫描影像, 需要对数据进行高精度视场拼接构成一副完整无缝影像^[16].

在地面解决由于偏流角校正带来的图像的拼接有两个方法:

- 1) 采用图像匹配的方法对 A1, A2, A3 片以 A2 为基准进行配准.
- 2) 利用轨控和相机焦面等参数, 对 A1, A2, A3 分别建立不同的模型进行几何校正.

在实际中, 由于测量精度特别是姿态控制精度的原因, 采用第二种方法利用轨控和相机焦面等参数, 对 A1, A2, A3 分别建立不同的模型进行几何校正不可靠. CBERS-02B 卫星姿态稳定度为 0.001° , 则可能导致的误差为: $780000 \times \tan(0.001) / 2.36 = 5.77$ 个像元. 因此, 必须在地面采用视场拼接的算法对图像进行处理, 在此基础上对上下 3 片错位的图像构建统一的严格几何模型对地定位.

3 视场拼接算法

3.1 图像配准算法

视场拼接的技术内涵, 是利用非共线 TDI CCD 的片间摄影几何约束, 基于地物成像的连续性, 建立拼接景与原始影像的像点坐标映射关系.

在单景影像范围内 CCD A1 与 A2 间及 A2 与 A3 间垂轨、沿轨方向的拼接位置并不是固定不变的.

图像配准的过程中, 第一步就是特征空间的选择, 特征空间是图像配准, 同时是几乎所有的高层图像处理或计算机视觉的基础. 在图像配准过程中, 一般将边沿、曲线、角点、直线交点等地物特征比较明显的区域作为特征空间选择的标准. 由于在 CBERS-02B 星的数据处理分系统中, 既没有储存自动控制点等信息, 也不能人机交互选取特征空间, 因此, 必须找到一种自动选择寻找特征空间的方法, 地物特征比较明显的区域也即是信息比较丰富的区域; 而对某一区域的均方差开平方根之后再对其取对数即得到信噪比, 均方差大说明该区域的信息比较丰富; 因此, 最大均方差方法从物理意义来说与选取地物特征比较明显的区域作为特征空间的方法是一致的.

由于重叠的区域很小, 在这里选取待配准图像数据块的大小由 2.1 小节中可知只能是 7×7 , 由此带来: 根据相似性测度计算出来的待配准图像数据块对应的配准图像数据块非常可能是假的 (根据后来实际的计算, 在某些细节比较差的图像中有 80% 的概率是假的). 该如何验证、确定待配准图像数据块对应的配准图像数据块的真假是本部分中解决问题的关键.

配准算法的关键是正确的配准匹配对, 如图 6 所示. 其中, P_i 与 P_{ii} 表示经过特征匹配计算后得到的匹配点对, 但在由于不能进行金字塔配准且配准可选取的特征空间很小, 因此计算得到的匹配点可信度有限. 即使特征空间内两片图像的相似度足够高, 配准选取的同名点误匹配也比较大.

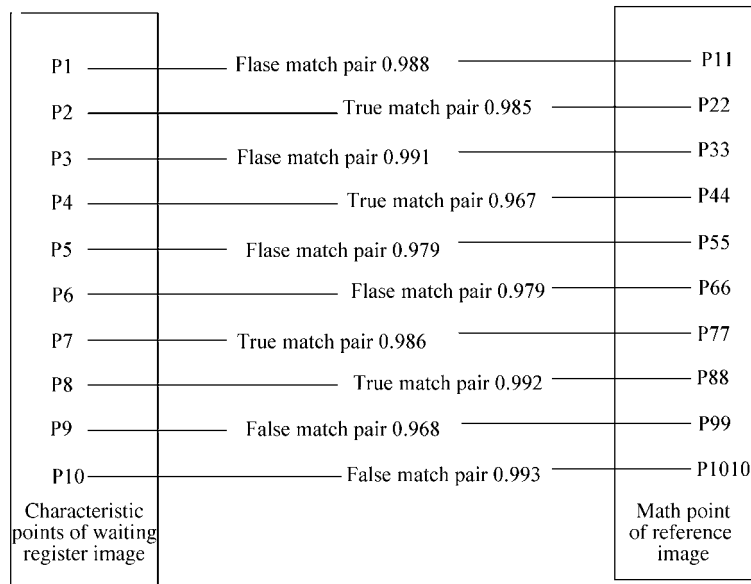


图 6 配准匹配对选取

Figure 6 The selection of registration match pair

如果某特征点对应的匹配点为真正匹配点, 则应该具有以下属性 (以图 6 中 P2-P22 匹配对为例), 假设 P2-P22 对行方向重叠的像元数为 X , 列方向重叠的像元为 Y ; 然后对 P_i 至 P_{ii} 都进行如下操作, $P_{ii}.Y = P_i.Y + Y, P_{ii}.X = P_i.X + X$, 则新的匹配对 (P_i, P_{ii}) 的相似度都应该比较高. 如果出现匹配对中相似度比较低, 则就可以认为该特征点对应的匹配点为假匹配点, 予以剔除.

对于用来测试验证新匹配对的相似度值, 可以先预置一个阈值. 在程序中采用循环或者迭代的方法对这个阈值根据具体的图像进行调整直至至少选取到 1-2 个正确的匹配点为止.

解决地形、高程差等原因带来图像畸变可以借助上面方法 2 中的阈值. 阈值的真正涵义是相似度, 如果阈值比较大 (如 0.980 以上) 说明在此状态下所有匹配对的效果是比较好的, 则认为此状态下的 dx, dy 即为所求之 dx, dy . 如果阈值比较小 (如 0.970 以下) 说明在此状态下有些匹配对的匹配效果是不理想的, 因此必须找出这些匹配效果不理想的匹配点的真正匹配点. 将图像在扫描方向上每 256 扫描行进行一次匹配, 找出在 Y 向上图像变化的轨迹.

对于不同时间或不同地区成像获取的影像数据, 由于偏流角控制、姿态稳定度、轨道高度、地形起伏和行积分时间等情况的不同, 每相邻两片 TDI CCD 影像之间的垂直偏移量和水平偏移量也是不同的, 并且很难基于某种规律确定, 实际处理的过程中只能先给定一个粗略的经验值.

尽管如此, 原始影像两侧的垂直偏移量之差以及两侧的水平偏移量之和却是有一定规律可循的^[17], 可以通过在轨测试分析, 得出一些有价值的结论以辅助成像数据的内视场拼接处理. 例如, A1, A2 之间或者 A2, A3 之间的水平重叠度往往会小于匹配模板的宽度, 可以基于原始影像两侧的水平重叠度之和基本固定的特点, 首先获得一侧的水平重叠像元数, 记为 $H1$, 然后另一侧的值即 $H2 = H - H1$, 这里 H 是两侧水平重叠像元个数的总和.

此外, 根据相机的侧摆角与两侧垂直偏移量之差的映射关系, 在获取了原始影像左侧的垂直偏移量之后, 预测原始影像右侧的垂直偏移量. 通常情况下, 基于片间偏移特性的先验知识, 对连接点像点

坐标的预测可以达到 2 个像素以内的精度水平. 根据 3 片非共线 TDI CCD 的成像特点, 判断和剔除无效或异常的匹配值, 保留可靠性较高的连接点, 可参考以下几点^[18]:

(1) 相机在轨成像时, 片间水平偏移量主要受偏流角控制的影响, 但在一景之内偏流角控制偏差具有系统性, 通常情况下, 一景范围内水平偏移量变化在 1 个像元范围内;

(2) 在一景之内姿态角控制较为稳定, 当积分时间恒定时, 相邻 TDI CCD 影像的垂直偏移量主要受地形起伏影响而变化, 但除非是地形非常陡峭的地区, 否则变化也不会太明显, 一般在 1-2 个像素范围内波动;

(3) 对于 HR 影像, 积分时间变化后垂直偏移量将发生渐变, 大约在 2600 条扫描行之后, 垂直偏移量再次接近于一个常量, 与积分时间跳变之前的片间垂直偏移量相差大约 5-6 个像元;

(4) 原始影像两侧的水平重叠度之和接近于常量.

3.2 仿射变换模型

尽管随着卫星飞行速高比的变化, TDI CCD 行积分时间会出现跳变, 但大多数情况下一景之内的行积分时间是不变的, 此时只需要对 A2 影像建立单一仿射变换模型, 可将其视为分段仿射变换模型的一种特例^[19].

在影像 A1 和 A2 之间、A2 和 A3 之间分别提取若干连接点, 用虚线连接每对连接点.

基于连接点构建虚拟 CCD2 影像和 A2 影像的像点变换关系. 假设某段原始影像左侧有 n_1 对连接点, 在原始影像坐标系下的位置分别为 (x_{1i}, y_{1i}) 和 (x_{2i}, y_{2i}) , $i = 1, 2, \dots, n_1$; 右侧有 n_2 对连接点, 在原始影像坐标系下的位置分别为 (x_{2i}, y_{2i}) 和 (x_{3i}, y_{3i}) , $i = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$, 下标 1, 2, 3 用以区分像点所在的 TDI CCD 编号.

以影像 A1 和 A3 为参考, 计算连接点在虚拟扫描景上的像素坐标 (s, l) : 对于左侧连接点 $(s_i, l_i) = (x_{1i}, y_{1i})$, $i = 1, 2, \dots, n_1$; 对于右侧连接点 $(s_i, l_i) = (x_{3i}, y_{3i})$, $i = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$.

将 A2 影像变换为虚拟 CCD2 影像之后, 中间片上连接点的坐标也将从 (x_{2i}, y_{2i}) 转换为 (s_i, l_i) . 这里基于二维仿射变换即二元一次多项式构建这种坐标转换关系, 如式 (6) 和 (7) 所示, $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 是 6 个待求的仿射变换系数^[20].

$$\begin{cases} x_{2i} = a_0 + a_1 \times s_i + a_2 \times l_i, \\ y_{2i} = b_0 + b_1 \times s_i + b_2 \times l_i, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n_1; \quad (6)$$

$$\begin{cases} x'_{2i} = a_0 + a_1 \times s_i + a_2 \times l_i, \\ y'_{2i} = b_0 + b_1 \times s_i + b_2 \times l_i, \end{cases} \quad i = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2. \quad (7)$$

式中: a_0 表示行方向上的平移量, 与片间的水平重叠有关; a_1 表示沿行方向上的缩放系数; a_2 表示影像在行方向上的旋转系数; b_0 表示列方向上的平移量, 与片间的垂直错位有关; b_1 表示在列方向上的旋转系数; b_2 沿影像列方向上的缩放系数.

经验表明, 二维仿射变换能很好地处理不同影像间的旋转、平移、缩放等变换关系. 对于每对连接点, 在式 (6) 和 (7) 的基础上构建误差方程式, 也就是说, 通过最小二乘平差计算 7 个仿射变换参数.

4 基于 HR 偏航角补偿精度误差分析及对地面成像的影响

假定 3 片 CCD 间没有安装误差, 根据 CCD 排列方式的几何关系和上述观察结果, 可估算在这种



图 7 偏流角未补偿前中间与右边 CCD 拼接情况

Figure 7 The situation of before recoup splice the middle and the right CCD

情况下卫星偏流角为

$$\arctan((160 - 21)/2600) = 3.082^\circ. \quad (8)$$

另外进行偏流角补偿时, 还需要考虑姿态的偏航角 (在实际计算时如果姿态值很小 $< 10e - 4$ rad, 也可以不考虑). 补偿值等于计算的偏流值减去卫星姿态偏航角测量值. 偏流角补偿的目标是为了保持地面速度与 CCD 方向垂直. 所谓偏流角补偿就是通过对 CCD 扭转一个角度, 使得 CCD 的方向与卫星在地面的轨迹方向相垂直. 这个扭转 CCD 的操作实际上和卫星的姿态偏航角的旋转轴相一致. 因此下传时, 将偏流角补偿值合并到姿态偏航角中下传, 则下传的姿态偏航角等于偏流角补偿值加上卫星姿态偏航角测量值.

以偏流角经补偿前获取的某景一级产品拼接区局部为例, 如图 7 所示裂缝宽度高达约 156 pixel.

以偏流角经补偿后获取的某景一级产品拼接区局部为例, 采用视场拼接进行拼接, 拼接效果如图 8 所示, 可见没有因为重合区过大或存在裂缝而发生的拼接错位现象.

利用卫星在 ECR 中速度矢量 V_s 与地球自转线速度矢量 V_E , 可根据偏流角计算公式

$$\theta = \arccos \left(\frac{V_s \circ (V_s + V_E)}{|V_s| \times |V_s + V_E|} \right). \quad (9)$$

根据理论上偏流角 θ 和该范围内卫星下传姿态辅助数据中的偏航角, 可计算得到偏航角误差. 如图 9 和 10 所示.

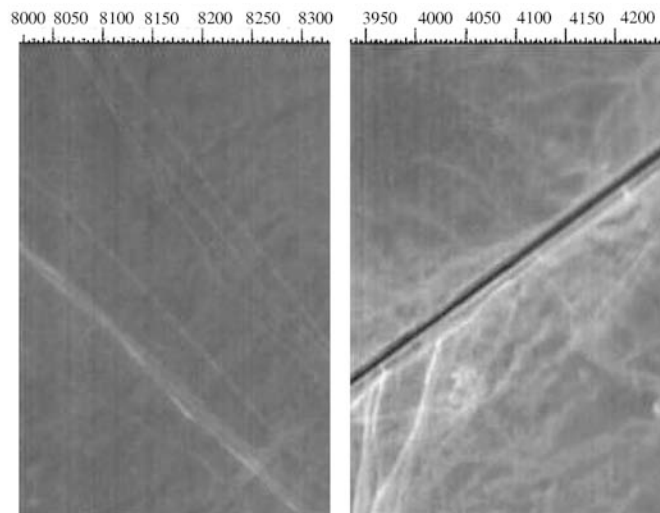


图 8 偏流角补偿后 CCD 拼接情况

Figure 8 The situation of after recoup splice CCD

(a) A1 CCD and A2 CCD splice; (b) A2 CCD and A3 CCD splice

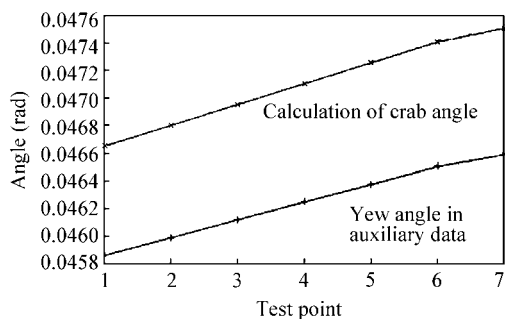


图 9 一景图像内计算得到的偏流角和姿态偏航角

Figure 9 Calculation of crab angle and yaw angle in one scene

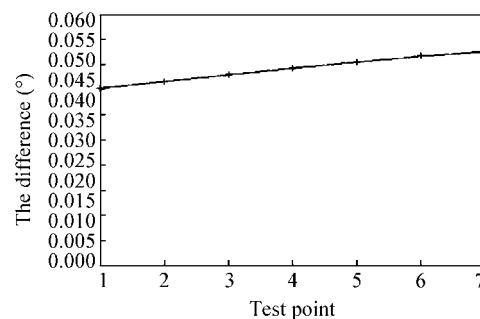


图 10 偏流角与姿态偏航角之差

Figure 10 The difference of crab angle and yaw angle

由图 10 可见, 偏流角与姿态偏航角之差即偏航角误差在 0.045–0.055 范围之内, 小于偏流角修正误差设计指标 $0.3^\circ (3\sigma)$. 图像在像元排列方向错位小于 $\tan(0.055) \times 2600 \times 2 = 5$ 个像元.

因此, 星上偏航角校正是有效的, 在此状态下, 地面影像不会出现漏扫、裂开现象, 可以地面影像灰度特征为基础实施影像的拼接试验.

5 基于 HR 影像的拼接实验

基于第 3 节的视场拼接模型算法, 对图像进行拼接实验 (先建立图像配准连接点对, 再构建片间的仿射变换模型), 拼接结果如图 11 所示.

图 11 为 A1 与 A2 的拼接效果图. 拼接区基本无缝. 连接点在水平和垂直方向上的拼接误差 Δdx 和 Δdy 如表 1 所示. 从表 1 中可以发现, 连接点的拼接精度达到子像元级别.



图 11 原始影像与拼接后影像
Figure 11 Original image and splice image

表 1 连接点在水平和垂直方向上的拼接误差
Table 1 Splice error of tie-point in horizon and vertical direction

Test point	dx	dy
1	-0.252	0.213
2	-0.145	0.211
3	0.561	0.237
4	0.359	-0.395
5	-0.341	0.254
6	-0.125	-0.121
7	-0.356	0.021
8	0.325	-0.167
9	0.234	-0.386
Mean	0.260	-0.133

6 结论

星载视场拼接 TDI CCD 相机特殊的成像机理和物理结构给其成像数据的高精度和高质量几何处理带来了一些新的问题. 本文以 CBERS 02B 星 HR 相机为参考原型, 对视场拼接成像 TDI CCD 相机的成像特点, 偏航角、积分时间、平台稳定性、姿轨误差对地面成像的影响, 成像数据的片间成像几何关系模型等开展了研究.

同时, 对卫星的星上偏航角补偿精度进行了验证. 以 3 片视场 TDI CCD 成像数据的视场拼接理论为基础研究了焦平面内非共线 TDI CCD 相机视场拼接算法. 拼接几何精度达到子像素级别, 为获得高分辨率内部几何高精度数据构建统一的严格成像模型奠定了基础.

参考文献

1 Hu F. Theory algorithm study on three-trailer without on line splice of TDI CCD in field of view (in Chinese). Doctoral Dissertation. Wuhan: Wuhan University. 2011

- 2 Long X. In Orbit Test Report of CBERS 02B HR Camera Drift Angle Correcting and Image Registration (in Chinese). In Orbit Test Report of CBERS 02B. 2007
- 3 Wang M, Hu F, Wang H. A fast algorithm for back project calculation of linear array pushbroom imageries based on object-space geometric constraints (in Chinese). Act Geod Cartograph Sinic, 2008, 37: 384–390
- 4 Wang M, Hu F, Jin S. Object-space back project coordinates calculation algorithm for ADS40 imageries (in Chinese). Geom Inform Sci Wuhan Univ, 2009, 34: 187–190
- 5 Hu F, Wang M, Li D, et al. Generation of approximate epipolar images from linear pushbroom satellite stereo-imagery based on projection reference plane (in Chinese). Act Geod Cartograph Sinic, 2009, 38: 428–436
- 6 Li S, Liu T, Wang H. Image mosaic for TDI CCD push-broom camera image based on image matching (in Chinese). Remote Sens Techn App, 2009, 24: 374–378
- 7 Long F, Zhang W, Liu J. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras (in Chinese). J Harbin Inst Techn, 2002, 34: 382–384
- 8 Zhang Y, Gong D. Application of High-resolution Satellite (in Chinese). Beijing: Science Press. 2004
- 9 Li Y. Study of the drift angle control in a space camera (in Chinese). Optic Prec Eng, 2002, 10: 402–406.
- 10 Li X. Effect analysis of orbital and attitude parameter error on TDI-CCD's line-shift frequency and veer angle (in Chinese). Chinese J Spac Sci, 2008, 28: 254–259
- 11 Yuan X. Effect analysis of orbital and attitude parameter error on TDI-CCD's line-shift frequency and veer angle (in Chinese). Aer spac Shanghai, 2006, 6: 10–13
- 12 Okamoto A. Orientation theory of CCD line-scanner images. Int Arch Photogr Remote Sens, 1988, 27: 609–617
- 13 Okamoto A, Hattori S, Hasegawa H, et al. Orientation and free network theory of satellite CCD line scanner imagery. Int Arch Photogr Remote Sens, 1996, 31: 604–610
- 14 Fraser C S, Hanley H B. Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery. Photogr Eng Remote Sens, 2003, 69: 53–57
- 15 Hu Y, Hu X, Wang X, et al. The influence of drift angle on satellite photography of three line array camera (in Chinese). Act Geod Cartograph Sinic, 2006, 4: 62–63
- 16 Jiang W, Zhang J, Zhang Z. Simulation of three-line CCD satellite images from given orthoimage and DEM (in Chinese). Geom Inf Sci Wuhan Univ, 2002, 27: 414–419
- 17 Wang R. Photograph Measurement Principle of Three Linear Array CCD Satellite (in Chinese). Beijing: Map Press. 2006
- 18 Yang B. Application of TDICCD in space image sensor (in Chinese). Spac Recov Remote Sens, 1997, 18: 15–18
- 19 Yang X, He X, Zhang L, et al. Effect and simulation of the deviant angle error on TDI CCD cameras image (in Chinese). Opto Electr Eng, 2008, 35: 45–50
- 20 Yang Y, Guo Y, Fu R. Study on field butting of TDICCD (in Chinese). Optic Tech, 2003, 29: 226–228
- 21 Zhang X, Ren J. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane (in Chinese). Acta Optic Sinic, 2006, 26: 740–745

Analysis of image quality and processing method of a space-borne focal plane view splicing TDI CCD camera

LONG XiaoXiang*, WANG XiaoYan & ZHONG HuiMin

China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

*E-mail: hustlxx@tom.com

Abstract This paper analyzes influences on ground imaging by a TDI CCD camera with a linear focal plane array. Various factors are taken into account: satellite yaw angle, camera integration time, stability of the platform, attitude and orbital errors, linear array precision, direction of change of dislocation (variation of point)

and image distortion in the direction of the ground scan (variation of line). Using HR camera images recorded by the CBERS-02B satellite, we discuss a method for processing data suffering from image dislocation due to yaw angle: image registration affine transformation based on a ground image. Employing ground registration tests of the CBERS-02B HR linear array, we analyze the satellite's compensation accuracy and error of yaw angle, and the causes of image distortion.

Keywords TDI CCD, yaw angle, view splicing, image registration