

空间相机交错拼接线列探测器重叠像元数计算

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 大视场相机焦平面通常由多个线列探测器交错拼接而成。为保证相机在对地成像中不出现漏缝, 提出一种相邻探测器重叠像元数计算方法。通过坐标变换法建立空间相机对地成像模型, 分析了漏缝产生的原因。分析了像点在前后两行探测器上沿线列方向的相对位移情况, 并利用蒙特卡罗法分析轨道、姿态扰动以及目标高程等因素对像点相对位移计算结果的影响, 像点位移计算结果的最小值即为相邻探测器最小重叠像元数, 依此给出了相邻探测器的重叠像元数计算模型。将该方法应用于某红外相机焦平面的设计, 根据该方法确定了各相邻探测器的重叠像元数, 并通过红外遥感图像的匹配实验验证了该方法的正确性。

关键词 遥感; 重叠像元; 对地成像模型; 线列探测器; 交错拼接

中图分类号 TP705; V447⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0128003

Calculation of Overlapping Pixels of Staggered Linear Array Detectors for Space Camera

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

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

² Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The focal plane of wide-field space camera is always comprised of several staggered linear array detectors. In order to ensure the coverage area of the camera without gap, a calculation method of overlapping pixels for staggered linear array detectors is proposed. The earth imaging model of the camera is established by utilizing coordinate transformation, and the reason that leads to gaps is discussed. The relative image motion between the leading and trailing rows of detectors along the direction of the linear array is calculated, and the influences on relative image motion introduced by orbital displacement, attitude disturbance and terrain elevation are analyzed based on Monto-Carlo method. The minimum value of the relative image motion is the minimum overlapping pixels of the adjacent detectors, so the calculation model of overlapping pixels of the adjacent detectors is given. The method is used in the design of the focal plane of an infrared camera, and the overlapping pixels of the adjacent detectors are determined. The method is validated by the matching test results of the infrared remote sensing images.

Key words remote sensing; overlapping pixels; earth imaging model; linear array detector; staggered assembly

OCIS codes 280.4788; 040.5160; 220.4610; 110.2960

1 引 言

作为空间对地观测的重要手段之一的空间相机, 相机视场是某一项重要技术指标, 相机视场决定了空间相机对地观测的幅宽, 而单片线列探测器长

度无法满足空间相机视场进一步扩展的要求, 将多片线列探测器交错拼接成更长的线列探测器是一种较为现实的解决方案。探测器交错拼接^[1]是将探测器成前后两行交错排列, 行距让开一定距离, 相邻探

收稿日期: 2013-06-25; 收到修改稿日期: 2013-09-12

基金项目: 武器装备预研基金(9140A21041210ZK0702)

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

E-mail: qinghyun2007@163.com

导师简介: 孙胜利(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大型光电仪器的空间应用方面的研究。

E-mail: palm_sun@mail.sitp.ac.cn

测器之间首尾像元相接,有一定数量的重叠像元,以保证相机不会出现漏扫。探测器交错拼接技术在空间相机焦平面设计中被广泛应用,如中巴资源卫星02B星高分辨率(HR)相机^[2]由3片时间延迟积分(TDI)CCD交错拼接而成,拼接后线视场长度为122.88 mm;美国EO1搭载的先进陆地成像仪(ALI)^[3]相机视场角为15°,相机焦平面设计由20片线列探测器交错拼接而成。

探测器交错拼接的一个重要问题是相邻探测器重叠像元数的计算,计算重叠像元数要依据以下两个原则:重叠像元数要保证相机能正常对地成像,即空间相机在执行对地观测任务中不能出现漏扫情况;在保证相机正常对地成像的同时应减少冗余重叠像元,过多的重叠像元数会增加数据量,导致资源浪费。文献[4]给出了空间相机垂直对地成像时重叠像元数的计算公式,文献[5-6]分析了相机前、后摆对地成像情况,提出一种焦平面CCD的非均匀重叠像元数交错拼接方法,即根据相机摆角为各相邻探测器设计不同的重叠像元数。前述计算方法并未充分考虑空间相机对地成像特性,重叠像元数的计算应综合考虑空间相机、卫星姿轨以及地球模型等因素的影响。本文从空间相机对地成像特性着手,通过坐标变换法建立空间相机对地成像模型,并耦合了影响相机对地成像的各种因素,给出探测器重叠像元数的计算模型。

2 相机对地成像特性分析

2.1 对地成像模型

相机对地成像模型是分析相机对地成像情况的基础,其实质是通过一系列坐标系间的转换,建立目标与像点之间的一一对应关系。地心旋转坐标系内对地成像几何关系如图1所示,在地心旋转坐标系

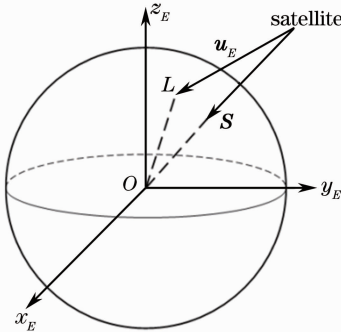


图1 地心旋转坐标系内对地成像几何关系

Fig.1 Geometrical relationship of earth imaging in earth centered rotation coordinate

内,已知焦平面上像点 (x, y) 的视向量 u_E 和卫星位置向量 S ,由空间几何关系便可知像点对应目标 L 的地理坐标为

$$\begin{cases} X = S_x + \mu \times u_{E,x} \\ Y = S_y + \mu \times u_{E,y} \\ Z = S_z + \mu \times u_{E,z} \end{cases} \quad (1)$$

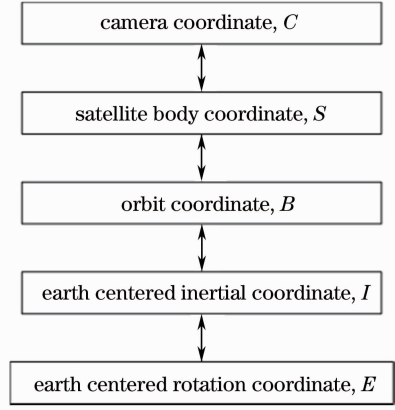


图2 对地成像模型中主要坐标系间的转换关系
Fig.2 Transformation relationship among the main reference coordinates in earth imaging model

式中 μ 为卫星到目标 L 的距离。(1)式中视向量 u_E 和卫星位置向量 S 可以通过一系列坐标变换计算得到,图2给出了5个主要坐标系之间的相互转换关系,5个坐标系分别为相机坐标系 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

$$u_E = R_{I2E} \cdot R_{B2I} \cdot R_{S2B} \cdot R_{C2S} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix}, \quad (2)$$

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

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

$$R_{C2S} = R_x(-\varphi) \cdot R_y(-\theta), \quad (4)$$

$$R_{S2B} = R_z(-\varphi') \cdot R_x(-\varphi'') \cdot R_y(-\theta'), \quad (5)$$

$$R_{B2I} = R_x(\pi/2) \cdot R_y(\pi/2) \cdot R_y(\Omega) \cdot R_z(i) \cdot R_y(\omega + v), \quad (6)$$

$$R_{I2E} = R_z(-\omega_e t), \quad (7)$$

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, φ 、 θ 分别为相机的侧摆角和前后摆角, φ' 、 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)和卫星位置向量 S ,也可以计算出对应像点坐标(x, y)。

2.2 拼接相机对地成像特性

为便于了解拼接相机对地成像特性,这里设置一组仿真试验参数,卫星运行在轨道高度 $H=800$ km的圆轨道上,轨道倾角 $i=98.5^\circ$,相机焦距 $f=1000$ mm,视场角 $2\omega=15^\circ$,相机焦平面由6片线列探测器交错拼接而成,探测器行间距 $2d=1.2$ cm,像元大小 $a=20\ \mu\text{m}$,相机最大侧摆角 $\max(|\varphi|)=30^\circ$,最大前后摆角 $\max(|\theta|)=30^\circ$ 。图3为相机焦平面示意图,先假定相邻探测器重叠像元数为0。

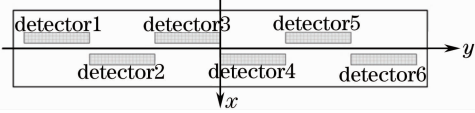


图3 焦平面示意图

Fig. 3 Sketch of the focal plane

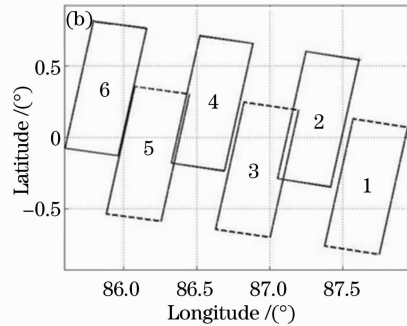
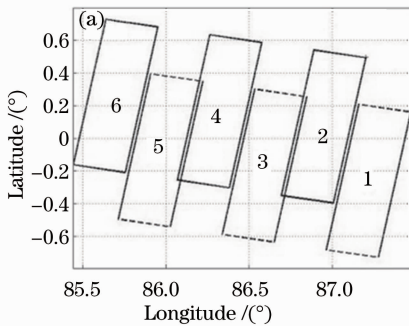


图4 卫星降轨时相机对地成像范围。(a)垂直对地成像;(b)前摆 30° 对地成像

Fig. 4 Coverage areas of the camera for the descending pass. (a) Vertical imaging; (b) forward oblique imaging with $\theta=30^\circ$

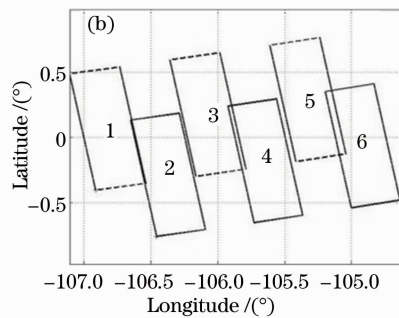
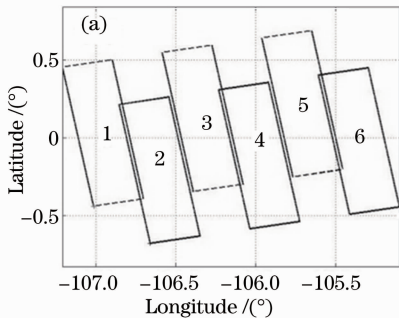


图5 卫星升轨时相机对地成像范围。(a)垂直对地成像;(b)前摆 30° 对地成像

Fig. 5 Coverage areas of the camera for the ascending pass. (a) Vertical imaging; (b) forward oblique imaging with $\theta=30^\circ$

图4(b)、图5(b)为相机前摆时相机对地成像区域情况,与垂直对地成像时一样,探测器1、2,探测器3、4,探测器5、6在卫星降轨时出现了漏扫现象,探测器2、3,探测器4、5在卫星升轨时出现了漏缝,但是各探测器间漏缝宽度并不相同,这说明漏缝宽

相机对地成像时,因前后两排探测器存在一定的视差,后排探测器1、3、5作前视成像,前排探测器2、4、6作后视成像,造成相机对地成像区域沿卫星运动方向呈交错排列。

利用相机对地成像模型以及探测器在焦平面的位置,可以计算出某时刻各探测器对应地面扫描行的位置,随着卫星沿轨道方向的运动,计算各成像时刻地面扫描行的位置即可得到相机对地成像区域^[9],图4、5分别为卫星降轨、升轨时相机对地成像区域情况。其中图4(a)为相机垂直对地成像时对地成像区域,可以看出探测器1、2,探测器3、4,探测器5、6之间出现明显的漏扫现象,且漏缝宽度基本相同,这主要是由于卫星偏流角引起的。卫星降轨运行时,偏流角方向偏向焦平面 $-y$ 方向,由于两行探测器先后对同一目标成像,故而会出现漏缝;而在卫星升轨运行时,偏流角方向偏向焦平面 $+y$ 方向,所以探测器2、3,探测器4、5之间出现漏缝,如图5(a)所示。

度除了与偏流角有关外,还与相机的摆角相关^[5],相机的摆角改变了探测器对地成像宽度,并且各探测器对地成像宽度变化不一致,所以造成相机对地成像区域出现宽度大小不一的漏缝。

3 重叠像元数计算模型

为保证相机对地成像时不出现漏缝,需要为相邻探测器增加一定数量的重叠像元数。像点相对运动示意图如图 6 所示,在某一时刻 t ,目标 L 成像于后排探测器上端点 $(-d, y_1)$,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 像点必定运动到前排探测器上某点 (d, y_2) ,这样就可以计算出目标 L 像点在两排探测器上的相对位移 $\Delta y = y_2 - y_1$,对于两个重叠像元数为零的相邻探测器而言,当 $\Delta y > 0$ 时对地成像区域会出现重叠,当 $\Delta y < 0$ 时对地成像区域则出现漏缝^[10]。

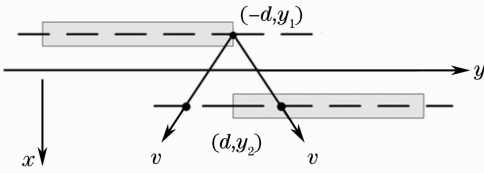


图 6 像点相对运动示意图

Fig. 6 Sketch of relative image motion

通过对地成像模型可以计算出 t 时刻像点 $(-d, y_1)$ 对应目标 L 的坐标,目标 L 与相机投影中心构成视向量 $\mathbf{r}(\Delta t)$ 。经过时间 Δt 后,目标 L 成像于前排探测器上,像点、投影中心以及目标 L 共线, $\mathbf{r}(\Delta t)$ 位于由投影中心以及前排探测器构成的平面内,即 $\mathbf{r}(\Delta t)$ 与该平面的法向量 $\mathbf{n}(\Delta t)$ 正交,满足 $\mathbf{r}(\Delta t) \cdot \mathbf{n}(\Delta t) = 0$ 。

构建视向量 $\mathbf{r}(\Delta t)$ 和法向量 $\mathbf{n}(\Delta t)$ 的内积方程:

$$f(\Delta t) = \mathbf{r}(\Delta t) \cdot \mathbf{n}(\Delta t), \quad (8)$$

求使 $f(\Delta t) = 0$ 时对应的 Δt 值,即可知道目标 L 成像于前排探测器上的时间 $t + \Delta t$ 。(8)式是一个非线性方程,可以使用牛顿迭代法求解,迭代关系可以表示为

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n - \frac{f(\Delta t_n)}{f'(\Delta t_n)} = t_n - \frac{f(t_n)}{[f(t_n + t_{\text{step}}) - f(t_n - t_{\text{step}})] / (2t_{\text{step}})}, \quad (9)$$

式中 n 为迭代次数, t_{step} 为时间计算步长,可设置为扫描行周期。 t_c 为收敛阈值,当 $|\Delta t_{n+1} - \Delta t_n| < t_c$ 时,视为收敛。

在求解 Δt 的同时也可以计算出目标 L 在前排探测器上的坐标 y_2 。对相机在轨工作期间的 Δy 值进行统计,找出 Δy 值的最小值即为保证相机正常对地成像的最小重叠长度 L_{overlap} ,即

$$L_{\text{overlap}} = |\min(\Delta y)|. \quad (10)$$

然后,根据像元大小就可以计算出最小重叠像元数 P_{overlap} ,即

$$P_{\text{overlap}} = L_{\text{overlap}} / a. \quad (11)$$

图 7 为垂直对地成像时 5 对相邻探测器重叠像元数变化曲线,在轨期间重叠像元数构成一个对称的闭合曲线,并且是星下点纬度的单调变化函数,在赤道处有极大、极小值 (± 41.12 pixel), 5 对相邻探测器重叠像元数值变化情况一致,因此,垂直对地成像时各相邻探测器可以采用相同的重叠像元数。

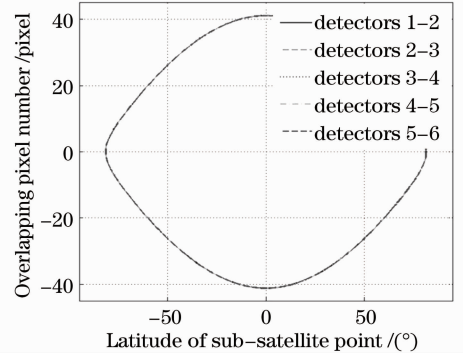


图 7 垂直对地成像相邻探测器重叠像元数计算结果

Fig. 7 Computation results of overlapping pixels of adjacent detectors for vertical imaging

相机对地成像时,为扩大对地观测范围通常会采用一定角度内侧摆、前后摆或者侧摆与前后摆组合对地成像的方法,此种情况下,需要对各相邻探测器在摆角范围内的重叠像元数进行全面分析。

图 8(a)为相机侧摆 $\pm 30^\circ$ 内成像时,重叠像元数与侧摆角的关系曲线,重叠像元数随侧摆角变大而减少,在相机垂直对地成像时重叠像元数值最大,表明当相机能正常垂直对地成像时,也能正常侧摆对地成像。图 8(b)为相机前摆 $\pm 30^\circ$ 内成像时,重叠像元数与前后摆角的关系曲线,重叠像元数随前后摆角变大而增加,重叠像元数随着视场的变大而增加,相机左右视场相同位置处重叠像元数相同,如探测器 2、3,在最大前后摆角为 10° 时,重叠像元数为 48 pixel,在最大前后摆角为 20° 时,重叠像元数为 56 pixel,由于探测器 4、5 与探测器 2、3 在 y 轴方向上关于中心视场对称,因此,探测器 4、5 与探测器 2、3 有相同的重叠像元数。

图 9 为相机最大侧摆角为 30° 、最大前后摆角为 30° 时探测器 1、2,探测器 5、6 重叠像元数计算结果,探测器 1、2、探测器 5、6 的重叠像元数相等,均为 109 pixel;同理也可以计算出探测器 2、3、探测器 4、5 的重叠像元数为 90 pixel,探测器 3、4 的重叠像元数为 73 pixel。

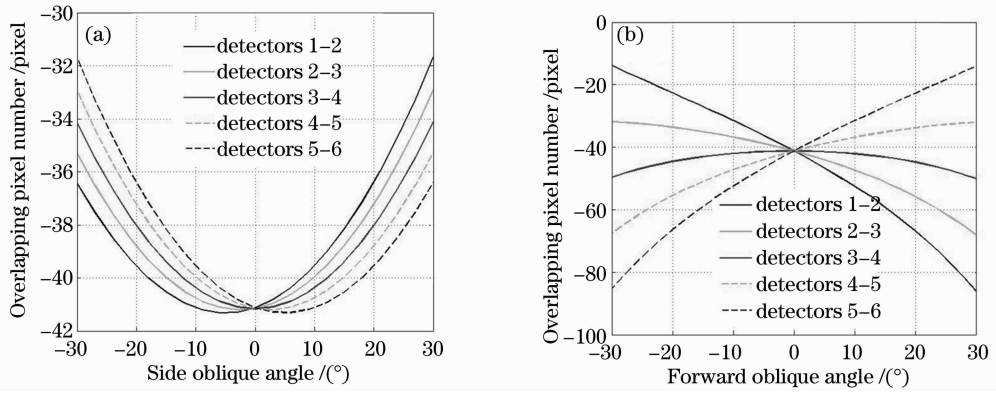


图 8 重叠像元数与摆角的关系曲线。(a)侧摆±30°成像；(b)前摆±30°成像

Fig. 8 Relationships between the overlapping pixels and oblique angles. (a) ±30° side oblique imaging; (b) ±30° forward oblique imaging

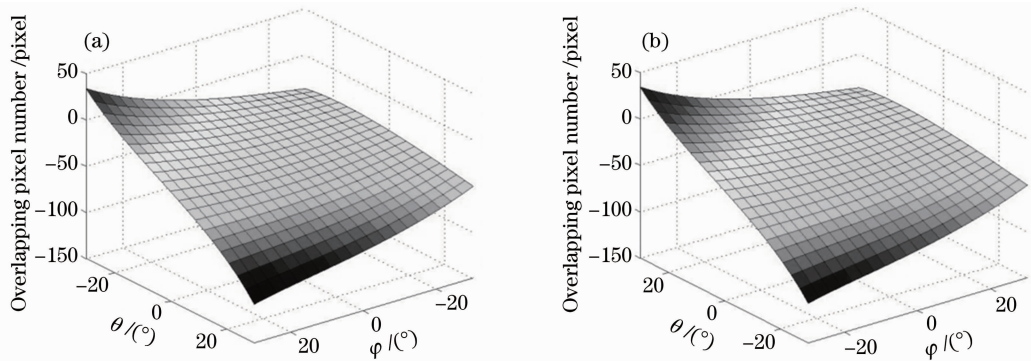


图 9 (a)探测器 1、2 和(b)探测器 5、6 重叠像元数计算结果

Fig. 9 Computation results of overlapping pixels of (a) detectors 1, 2 and (b) detectors 5, 6

表 1 为不同摆角范围内各探测器重叠像元数计算结果。从表中可以看出：1)相机作垂直、侧摆对地成像时，各相邻探测器可以采用相同的重叠像元数，侧摆成像时重叠像元数依据相机垂直对地情况计算即可；2)当相机作前后摆或侧摆和前后摆组合对地

成像时，重叠像元数与相机摆角、探测器偏离中心视场的距离成正比，且左右视场重叠像元数关于视场中心对称，因此，可以依照计算结果为相机半视场内的相邻探测器设计不同的重叠像元数。

表 1 不同成像条件下相邻探测器重叠像元数

Table 1 Overlapping pixels of adjacent detectors under different imaging conditions

max(φ) / (°)	max(θ) / (°)	Overlapping pixels / pixel				
		Detectors 1, 2	Detectors 2, 3	Detectors 3, 4	Detectors 4, 5	Detectors 5, 6
0	0	42	42	42	42	42
15	0	42	42	42	42	42
30	0	42	42	42	42	42
0	15	60	52	44	52	60
0	30	86	68	51	68	86
15	15	62	55	47	55	62
30	30	109	90	73	90	109

在实际计算中还需要考虑轨道、姿态扰动以及被摄目标高程等因素的影响，这些影响因素已耦合在重叠像元数计算模型里，由于计算模型包含较多的变量，且公式复杂，可以采用蒙特卡罗法^[11]进行综合分析，通过对影响因素的数值分布进行抽

样^[12]，代入计算模型，得到重叠像元数计算结果的分布范围，其最小值即为相邻探测器所需最小重叠像元数。文献[4-6]所述方法并未考虑轨道、姿态扰动以及被摄目标高程等因素，其计算结果包含于上述计算结果的分布范围内，导致重叠像元数计算

结果偏小,影响相机正常对地成像。

4 实际应用分析

某红外相机焦平面设计由4片探测器交错拼接而成,每片探测器像元数为512 pixel,像元大小为 $28\ \mu\text{m}$,相机在高度为791 km、倾角为 98.5° 的太阳同步圆轨道上垂直对地推扫成像,为完成探测器拼接需要确定3对相邻探测器的重叠像元数,由第3节内容可知3对相邻探测器可以设置相同的重叠像元数,因此,仅需确定视场中心两个相邻探测器的重

叠像元数。两行探测器行间距确定为 $2.012\ \text{mm}$,图10为该相机重叠像元数分析结果,图10(a)为视场中心像点相对位移计算结果, Δy 最小值为 $-0.138\ \text{mm}$,约为4.94 pixel,图10(b)为采用蒙特卡罗方法计算出的重叠像元数分布范围,取其最小值计算得到重叠像元数为7 pixel,其中,轨道定位精度优于 $0.1\ \text{km}$ 、稳定度优于 $0.01\ \text{km/s}$,姿态指向精度优于 0.1° 、稳定度优于 $0.01^\circ/\text{s}$,被摄目标高程最大值设定为 $9\ \text{km}$ 。考虑到设计冗余以及后续图像处理要求最终确定重叠像元数为10 pixel。

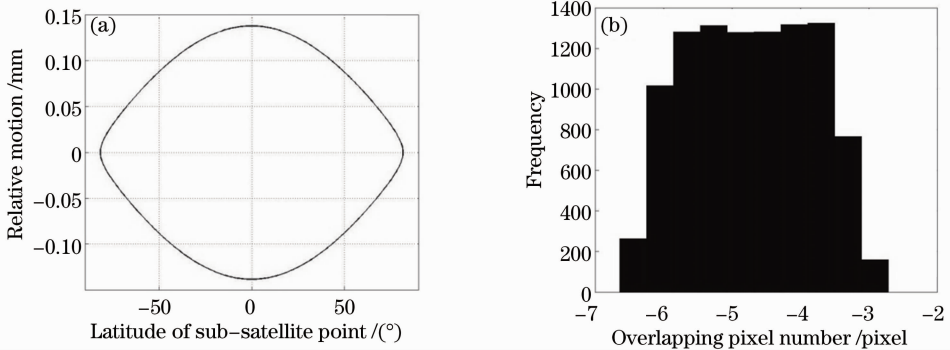


图10 重叠像元数计算结果。(a)像点相对位移计算结果;(b)蒙特卡罗法计算结果

Fig. 10 Computation results of overlapping pixels. (a) Result of relative image motion; (b) result of Monte-Carlo analysis

重叠像元数计算模型的正确性可以利用相机在轨试验数据的图像匹配结果来验证^[13]。已知图像中心地理坐标,就可以计算出该地理位置处的重叠像元数分布范围,如果图像匹配结果处于该范围内,则证明了计算模型的正确性。由于相邻探测器图像重叠像元数远小于图像行数,同时为了获得较高的匹配精度,这里采用扩展的归一化互相关方法^[14]进行图像匹配。图11、12为两组在轨红外原始图像及其图像拼接结果。

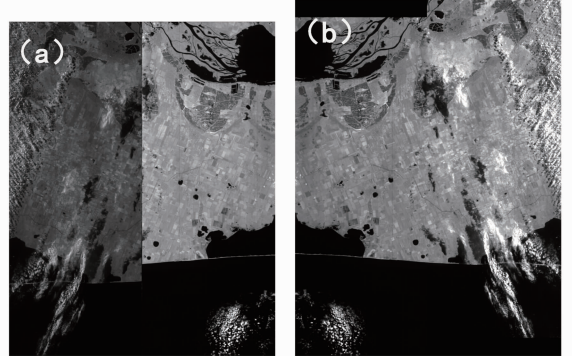


图12 卫星降轨相邻探测器重叠像元数估计。

(a) 红外原始图像;(b) 拼接图像

Fig. 12 Estimation of overlapping pixels between adjacent detectors for the descending pass. (a) Raw infrared image; (b) mosaic image

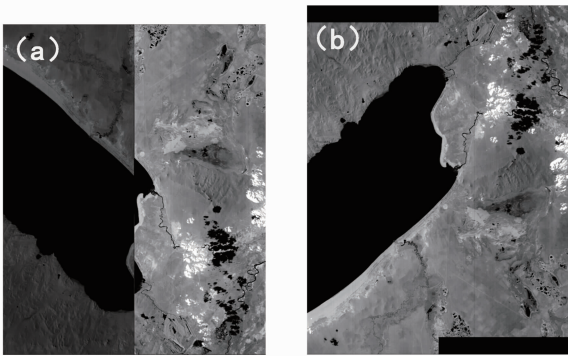


图11 卫星升轨时相邻探测器重叠像元数估计。

(a) 红外原始图像;(b) 拼接图像

Fig. 11 Estimation of overlapping pixels between adjacent detectors for the ascending pass. (a) Raw infrared image; (b) mosaic image

图11(a)为卫星升轨时相机所摄图像,图像左侧为探测器3图像,右侧为探测器4图像,星下点为内蒙古呼伦湖,图像中心纬度约为 49.09° ,该纬度处重叠像元数计算结果为 $11.57\sim 14.83\ \text{pixel}$,图像匹配结果为 $12.58\ \text{pixel}$;图12(a)为卫星降轨时所摄,星下点为乌克兰斯卡多夫斯克,图像中心纬度约为 46.31° ,左、右侧图像的匹配结果为 $6.44\ \text{pixel}$,符合该位置处重叠像元数分布范围 $4.90\sim 8.27\ \text{pixel}$ 。当卫星降轨运行到赤道上空时,赤道处重叠像元数分布范

围为 2.94~6.32 pixel,采用文献[4-6]方法计算的重叠像元数约为 5 pixel,若相邻探测器重叠像元数为 5 pixel 而不是 10 pixel,则在赤道处最严重会出现 2 pixel 的漏缝,相机无法正常对地成像,因此,在重叠像元数计算过程中,必须考虑各影响因素,否则会因计算模型不完整导致重叠像元数计算结果偏小。

从卫星下传图像数据的匹配实验来看,10 pixel 重叠像元数保证了相邻探测器图像至少有 3 pixel 重叠像元,图像匹配结果均处于重叠像元数计算范围内,相机在轨期间并未出现漏扫现象。

5 结 论

重叠像元数计算是相机焦平面探测器拼接前很重要的一步,因此,重叠像元数计算模型需要能真实地反映像点在前后两行探测器上的运动特性。基于坐标变换法建立的重叠像元数计算模型由于可以耦合各种影响因素,因此能获得精确的计算结果。该方法已在某型号空间相机焦平面设计中得到应用,并通过在轨图像数据得到了验证,该方法具有很强的扩展性,适用于各种成像条件下线列探测器、TDI 探测器交错拼接重叠像元数的计算,对于探测器拼接工作具有实际指导意义。在具体计算中,需要根据重叠像元数计算模型详细分析,当相机垂直或侧摆对地成像时,各相邻探测器可以采用相同的重叠像元数;当相机作前后摆或者侧摆与前后摆组合对地成像时,重叠像元数与探测器距离中心视场的位置和相机最大摆角有关,为节约卫星资源,各相邻探测器可以采用不同的重叠像元数,实际应用过程中,可根据探测器的有效尺寸先计算视场中心两相邻探测器的重叠像元数,依据重叠像元数确定视场中心两探测器位置,然后依次向边缘视场方向计算各相邻探测器的重叠像元数。

参 考 文 献

- 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.
- Long Xiaoxiang, Wang Xiaoyan, Zhong Huimin. Analysis of image quality and processing method of a space-borne focal plane view splicing TDI CCD camera [J]. *Science China: Information Science*, 2011, 41(s): 19-31.
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[J]. *中国科学:信息科学*, 2011, 41(s): 19-31.
- D E 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.
- Chen Shiping. Design and Test of the Space Camera [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. 279-286.
陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003. 279-286.
- Lü Hengyi, Liu Yang, Guo Yongfei. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras[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.
- 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.
- 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, Yan Changxiang. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1054-1060.
王 运,颜昌翔. 基于差分法的空间相机像移速度矢量计算[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(5): 1054-1060.
- Ma Hongcai, Jin Guang, Zhong Xing, *et al.*. Arrangement and shape optimization of solar concentrating receivers using Monte Carlo method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0308001.
马宏财,金 光,钟 兴,等. 基于蒙特卡罗法的太阳能聚光接收器布局及形状优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0308001.
- 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: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003. 27-29.
- 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. 基于球面投射透视旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0215001.
- 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.