

姿态变化对航空推扫式成像的影响分析

贤 光^{1,2}, 颜昌翔¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 航空推扫成像时, 由载机的姿态变化产生的像移是影响光学成像质量的主要因素之一, 可由稳定平台进行补偿。基于某机载成像光谱仪系统, 首先利用齐次坐标变换法建立像移速度矢量的精确计算模型, 分析了成像质量对飞行姿态精度的要求, 从而选定稳定平台参数。接着, 分析了姿态补偿残差对成像质量的影响, 得出引起的相对像移速度偏差仅为 10^{-1} , 为后续光谱定标和几何校正提供了参考。再次, 研究了给定成像要求的飞行参数指标的分配问题, 进行了像移速度误差分析。最后, 开展了飞行成像试验。结果表明所选的 PAV30 稳定平台能够确保成像期间的姿态稳定, 验证了上述分析正确合理。所提出的方法简单, 易于实现, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 航空相机; 姿态变化; 像移速度; 误差分配

中图分类号: V447.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)08-2478-06

Analysis of attitude change impact on aerial push-broom imaging

Xian Guang^{1,2}, Yan Changxiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The shift generated from aircraft attitude change was one of the main factors affecting the optical imaging quality in aerial push-broom imaging, which could be compensated by stable platform. In this article, based on an particularly airborne imaging spectrometer system, firstly the precise image motion velocity model was established by the homogeneous coordinate transformation method, and the flight attitude accuracy required by the imaging quality was analyzed, thus the parameters of stable platform could be choosed correctly. Then the influence of the residual of compensation of attitude on the imaging quality was analyzed, obtaining the relative shift speed deviation was only 10^{-1} , which providing references for the following spectral calibration and geometric correction. Again, to study the distribution of flight parameters of a given imaging requirement, the error analysis was carried out. Finally, the flight imaging test was carried out. The result showed that the selected PAV30 stable platform could ensure the demand of stability during imaging, which verifying the above analysis was correct and reasonable. The proposed method was simple and easy to implement, having a certain value in engineering.

Key words: aerial camera; attitude change; image motion velocity; error distribution

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-10

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103); 中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 贤光(1988-), 女, 博士生, 主要从事航空成像质量研究。Email: xg1004@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。Email: yancx@ciomp.an.cn

0 引言

航空遥感成像广泛应用于国民经济和科学技术的不同领域,其分辨率要求愈来愈高。航空推扫成像时,载机的姿态变化使 CCD 像面在曝光时与被照地物的影像存在相对运动,由此产生的像移是影响光学成像质量的主要因素之一,会导致图像模糊不清^[1],必须进行像移补偿^[2]。

目前国内外航空成像,计算像移的方法主要有矢量分解法与坐标变换法。研究重点在研制高精度的稳定平台^[3-4],在成像过程中进行姿态补偿,从而避免后续繁杂的像移补偿。矢量分解法^[5]虽然具有较好的实时性,但只能计算像面中心附近的像移,所以不适合大视场的遥感器;坐标变化法虽计算量大,但计算精度高。参考文献[6-7]分析了仅产生一种姿态变化的情况。

文中基于某低空机载宽幅成像光谱仪系统为例,利用齐次坐标变换法建立像移速度矢量的精确计算模型,分析了成像质量对飞行姿态精度的要求,从而选定稳定平台参数,并对姿态补偿残差对像移速度的影响进行了分析。接着,综合姿态参数对成像质量的影响的分析结果,提出了满足成像质量要求的姿态参数指标分配计算方法,并根据蒙特卡罗方法对分配的误差指标进行了误差综合,结果表明能够满足成像质量的要求。该理论方法已得到了实际应用,可为航空相机的设计提供参考。

1 像移速度矢量模型推导

空间推扫式成像系统的工作原理是沿空间飞行器正下方垂直于飞行方向的地球表面的一条线成像,依靠平台的运动来扫描成像。飞行姿态参数对光学成像的影响可通过像移速度矢量来体现^[7]。为了定量分析航空相机的像移,需建立相关坐标系,为后续建模过程中坐标变换奠定基础。从地面拍摄物到航空相机的坐标变换过程中,涉及5个坐标系,各坐标系定义如下(全部采用右手法则):

(1)地物坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$,原点在地球表面, G_1 轴指向飞机飞行方向, G_3 轴负向指向地心, G_2 轴在地表平面内与 G_1 轴垂直。

(2)航行轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$,原点在轨道

上, G 系沿 G_3 平移 H (飞行高度),沿 G_1 平移 Vt (V 飞行速度)。由于飞行速度是相对地面的速度,航行轨道坐标系与地物坐标系只考虑平移关系。

(3)载机坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$,飞机无姿态运动时该系与 B 系重合。当有飞机有偏航运动时沿 B_3 轴旋转 Ψ ,有俯仰运动时沿 B_2 轴旋转 θ ,有横滚运动时沿 B_1 轴旋转 ϕ 。飞机的三轴姿态 $\phi=\phi_0+\dot{\phi}t, \theta=\theta_0+\dot{\theta}t, \Psi=\Psi_0+\dot{\Psi}t$,即指 S 系在 B 系内的三轴姿态(推导过程中,飞行器的三轴姿态运动的次序为:横滚、俯仰、偏航)。

(4)相机坐标系 $C(C_1, C_2, C_3)$,原点 C_0 为望远镜物镜的主点, S_1, S_2 与 C_1, C_2 反向,坐标系以比例尺(f/H)缩小。相机一般是通过稳定平台安装在飞机上,安装误差很小可忽略不计。

(5)像面坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$,原点 P_0 在像面中心, C 系沿 C_3 轴平移 f (相机物镜焦距),既得到 P 系, P_1 和 P_2 组成像面。

可以通过齐次坐标变换法建立从地物在地理坐标系中的位置到像面坐标系中的像的相应关系^[8],如:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f/H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f/H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f/H & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -vt \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将方程两边对时间求导后令 $t=0$,即可得到想面上各点的像移速度方程(忽略高阶小量项 $\sin \phi_0 \cdot \sin \theta_0$):

$$V_1 = (fv \cos \theta_0 \cos \Psi_0)/H - \dot{\theta} f \cos \theta_0 - (\dot{\Psi} f G_2 \cos \theta_0 \cos \Psi_0)/H + (\dot{\theta} f G_1 \cos \Psi_0 \sin \theta_0)/H + (\dot{\Psi} f G_1 \cos \theta_0 \sin \Psi_0)/H + (\dot{\theta} f G_2 \sin \theta_0 \sin \Psi_0)/H \quad (2)$$

$$V_2 = \dot{\phi} f \cos \phi_0 \cos \theta_0 -$$

$$\begin{aligned}
 &G_2(\dot{\phi}f\cos\phi_0\sin\Psi_0)/H-(\dot{\Psi}f\cos\phi_0\sin\Psi_0)/H- \\
 &(\dot{\phi}f\cos\Psi_0\sin\phi_0)/H+(\dot{\Psi}f\cos\Psi_0\sin\phi_0\sin\theta_0)/H- \\
 &v(f\cos\phi_0\sin\Psi_0)/H-f(\cos\Psi_0\sin\phi_0\sin\theta_0)/H- \\
 &G_1(\dot{\phi}f\sin\phi_0\sin\Psi_0)/H-(\dot{\Psi}f\cos\theta_0\cos\Psi_0)/H+ \\
 &(\dot{\phi}f\cos\phi_0\cos\Psi_0\sin\theta_0)/H- \\
 &(\dot{\Psi}f\sin\phi_0\sin\theta_0\sin\Psi_0)/H-\dot{\theta}f\sin\phi_0\sin\theta_0 \quad (3)
 \end{aligned}$$

令 $t=0$, 则可以得到像面位置方程(即地物位置和像面位置之间的对应关系)。由于 φ_0 和 θ_0 都为小量, 忽略高阶小量 $\sin\phi_0 \cdot \sin\theta_0$ 后, 令 $p_1=p_2=0$, 则可得像面中心点对应的地物点的位置的简化公式:

$$G_1=H\left(\frac{-\sin\phi_0\cos\Psi_0}{\cos\phi_0\cos\Psi_0}-\frac{\sin\theta_0}{\cos\theta_0\sin\Psi_0}\right)\left(\frac{\cos\Psi_0+\sin\Psi_0}{\sin\Psi_0+\cos\Psi_0}\right) \quad (4)$$

$$G_2=H\left(\frac{\sin\phi_0\cos\theta_0}{\cos\phi_0\sin\Psi_0}-\frac{\sin\theta_0}{\cos\theta_0\cos\Psi_0}\right)\left(\frac{\sin\Psi_0+\cos\Psi_0}{\cos\Psi_0+\sin\Psi_0}\right) \quad (5)$$

2 成像质量对载机飞行姿态的要求与分析

空间相机成像质量的优劣一般用整个系统链路的调制传递函数值 MTF 来评价^[9]。该系统包括地面目标、大气、光学系统、像移、探测器、电子线路等各子系统。其中像移匹配残差引起的 MTF 为:

$$\text{MTF}=\frac{\sin(\pi df)}{\pi df} \quad (6)$$

式中: d 为像移移动量; f 为频率空间。设 CCD 像元尺寸为 a , 积分时间为 T_e , ΔV 为像移速度匹配残差, 则 CCD 奈奎斯特频率 $f=1/2a$, 像移移动量 $d=\Delta V \cdot T_e$, 其中 s 为相对像移移动量 $s=d/a$ 。图 1 是曝光时间 t 内相对移动量($0 < s < 1$)对 MTF 的影响。

为使航空相机具有较高的调制传递函数, 必须使载机姿态变化造成的像移速度匹配残差控制在一定范围内^[10]。MTF 下降 1.6%(根据总体指标要求确定)对成像质量无本质影响, 可以作为像移速度匹配误差的计算约束。经过计算, 对于航空相机而言, MTF 下降 1.6%时的相对像移移动量 $s=0.2$ 。为了获得奈奎斯特采样频率处较高的 MTF, 要求姿态变化造成的像移移动量:

$$d=\Delta V \cdot T_e \leq 0.2a \quad (7)$$

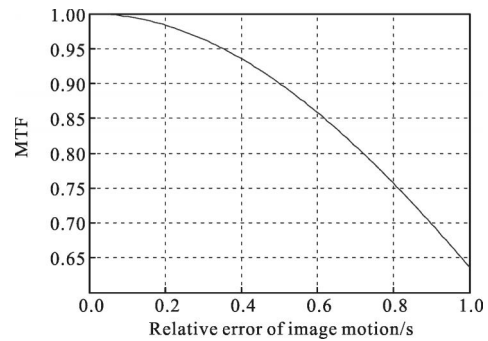


图 1 MTF 与相对像移移动量 s 的关系

Fig.1 Relationship between MTF and relative image motion s

下面基于某低空机载宽幅成像光谱仪系统为例, 来分析光学成像质量对载机姿态的精度要求。系统参数: 飞行高度为 2 km, 飞行速度为 200 km/h, 系统焦距为 9 mm, 刈幅宽度为 4 km, 探测器像元尺寸 18 μm , 光谱维方向两个像元合并。可算出其积分时间为 72 ms。像移速度匹配残差而得出的调制传递函数可分为空间维(垂直于推扫方向)和光谱维。故对应的姿态角变化引起的相对速度误差也:

$$\Delta V_{\text{光谱}} \leq 0.2a/T_e = 0.2 \times 36 \mu\text{m} / 72 \text{ ms} = 0.1 \text{ mm/s}$$

$$\Delta V_{\text{空间}} \leq 0.2a/T_e = 0.2 \times 18 \mu\text{m} / 72 \text{ ms} = 0.05 \text{ mm/s} \quad (8)$$

综合考虑总体指标要求, 最终选择莱卡公司的 PAV30 稳定平台, 来补偿载机姿态参数变化。其具体参数为: 横滚角、俯仰角范围 $\pm 5^\circ$; 偏航角范围 $\pm 30^\circ$; 角速度补偿精度 $< 0.3(^{\circ})/\text{s}$; 角度补偿精度 0.5° 。采用上节推导公式(2)、(3), 验证所选平台的精度要求, 可计算出其中心视场上, 光谱维像移速度偏差 0.047 2 mm/s、空间维像移速度偏差 0.042 8 mm/s, 边缘视场上, 光谱维像移速度偏差 0.094 3 mm/s、空间维像移速度偏差 0.044 0 mm/s, 满足成像要求。

3 姿态补偿残差对成像的影响分析

经过上节验证, 所选平台精度满足成像要求。在平台精度要求内, 具体哪些参数影响比较大, 可对后续光谱定标和图像处理有借鉴意义。

据图 2、3 所示横滚和俯仰导致的中心视场像移速度偏差分析得知, 姿态参数补偿残差引起的空间维像移速度偏差和光谱维像移速度偏差没有数量级上的变化, 几乎线性变化。因篇幅限制, 其他参数引起的像移速度偏差不再列举。故在精度范围内, 可随

机取个基值,具体分析姿态参数对像质的影响。

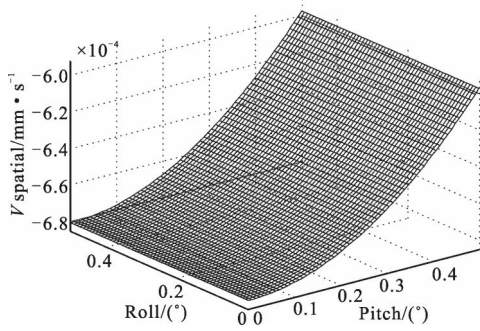


图 2 光谱维像移速度偏差

Fig.2 Spectral image motion error

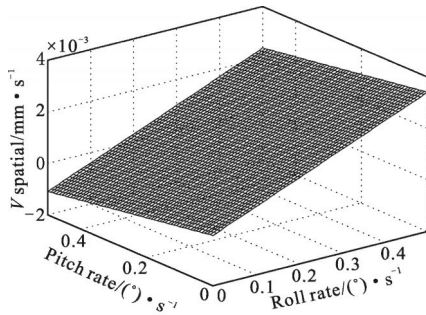
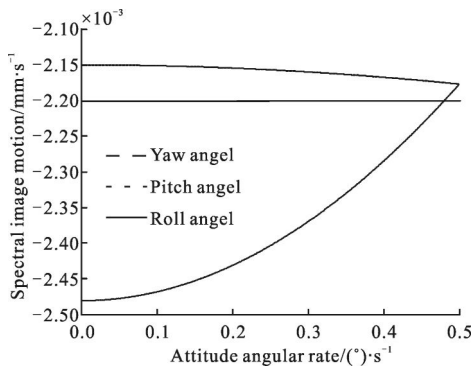


图 3 空间维像移速度偏差

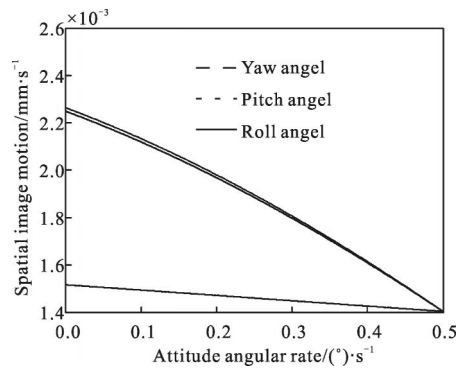
Fig.3 Spatial image motion error

姿态参数残差引起的像移速度变化,如图4所示。分析姿态角度影响时,姿态角速度取值为 $0.3(^{\circ})/s$;分析姿态角速度影响时,姿态角取值为 0.5° 。从图中可以分析出,所选平台精度范围内,该系统姿态参数残差引起的像移速度偏差在 10^{-3} 量级上微小变化,相对像移速度偏差仅为 10^{-1} 。相对来说俯仰角偏差和俯仰角速度偏差对像移速度的影响较明显变化。这个结论,对该系统后续光谱定标和几何校正有参考价值。

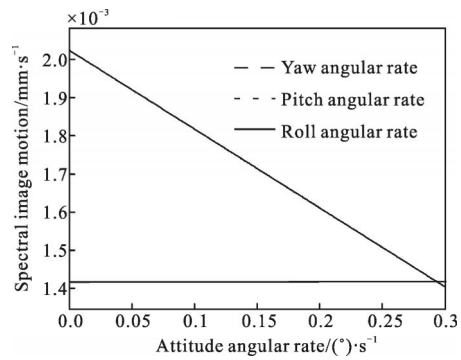


(a) 姿态角残差—光谱维像移速度

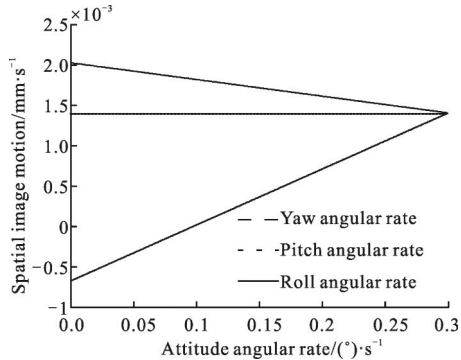
(a) Attitude angle—spectral image motion



(b) 姿态角残差—空间维像移速度
(b) Attitude angle—spatial image motion



(c) 姿态角速度残差—光谱维像移速度
(c) Attitude angle velocity—spectral image motion



(d) 姿态角速度残差—空间维像移速度
(d) Attitude angle velocity—spatial image motion

图 4 姿态参数残差引起的像移速度变化

Fig.4 Attitude parameter—image motion

4 像移速度误差分析

航空推扫成像像移速度误差主要由载机三轴姿态角测量误差、三轴姿态角速度测量误差、载机飞行高度测量误差、载机飞行速度测量误差、系统焦距测量误差等组成。各误差的概率分布及其分配的统计特征值,列于表1中。表中, X_0 为曝光时刻的姿态角; X_{max} 为飞机三轴姿态角的最大值; \dot{X} 为曝光时刻的姿

态角速率; σ_x 为各参数允许的测量误差; ΔX 为各参数的随机误差;

在 MATLAB 编程环境下, 采用蒙特卡洛方法^[1]通过对参数及其误差的随机分布进行抽样。计算并对结果进行统计, 便可得到像移速度误差的分布情况。对应公式中的 9 个正态分布的随机变量和 6 个均匀分布的姿态初始值, 共产生 15 个伪随机数序列。通过样本进行统计分析, 可以获得合成误差的统计特性。图 5、6 为各参量随机波动产生的像移速度误差概率分布统计直方图。

从图表可知, 像移速度误差近似服从正态分布, 光谱维上 97% 的像移速度误差分布在 $-0.05 \sim 0.05$ mm/s 范围内; 空间维上, 有 95% 的像移速度误差在 $-0.01 \sim 0.01$ mm/s 范围内, 满足成像质量的要求。

表 1 参数误差分布

Tab.1 Distribution of parameter error

Variable	Error distribution	Value of variable	Random error
Roll angle initial	Uniform	$\phi_{\max}=0.5^\circ$	$\phi_0=2(S_{1,i}-0.5)\phi_{\max}$
Pitch angle initial	Uniform	$\theta_{\max}=0.5^\circ$	$\theta_0=2(S_{2,i}-0.5)\theta_{\max}$
Yaw angle initial	Uniform	$\psi_{\max}=1^\circ$	$\psi_0=2(S_{3,i}-0.5)\psi_{\max}$
Roll rate initial	Uniform	$\dot{\phi}_{\max}=0.3^\circ/s$	$\dot{\phi}=2(S_{4,i}-0.5)\dot{\phi}_{\max}$
Pitch rate initial	Uniform	$\dot{\theta}_{\max}=0.3^\circ/s$	$\dot{\theta}=2(S_{5,i}-0.5)\dot{\theta}_{\max}$
Yaw rate initial	Uniform	$\dot{\psi}_{\max}=0.3^\circ/s$	$\dot{\psi}=2(S_{6,i}-0.5)\dot{\psi}_{\max}$
Roll angle error	Normal	$\sigma_\phi=0.05^\circ$	$\Delta\phi=T_{7,i}\cdot\sigma_\phi$
Pitch angle error	Normal	$\sigma_\theta=0.05^\circ$	$\Delta\theta=T_{8,i}\cdot\sigma_\theta$
Yaw rate error	Normal	$\sigma_\psi=0.1^\circ$	$\Delta\dot{\psi}=T_{10,i}\cdot\sigma_\psi$
Roll rate error	Normal	$\sigma_{\dot{\phi}}=0.03^\circ/s$	$\Delta\dot{\phi}=T_{10,i}\cdot\sigma_{\dot{\phi}}$
Pitch rate error	Normal	$\sigma_{\dot{\theta}}=0.03^\circ/s$	$\Delta\dot{\theta}=T_{11,i}\cdot\sigma_{\dot{\theta}}$
Yaw rate error	Normal	$\sigma_{\dot{\psi}}=0.03^\circ/s$	$\Delta\dot{\psi}=T_{12,i}\cdot\sigma_{\dot{\psi}}$
Focus error	Normal	$\sigma_f=0.9$ mm	$\Delta f=T_{13,i}\cdot\sigma_f$
Flight altitude error	Normal	$\sigma_H=10$ m	$\Delta H=T_{14,i}\cdot\sigma_H$
Flight velocity error	Normal	$\sigma_v=1$ m/s	$\Delta V=T_{15,i}\cdot\sigma_v$

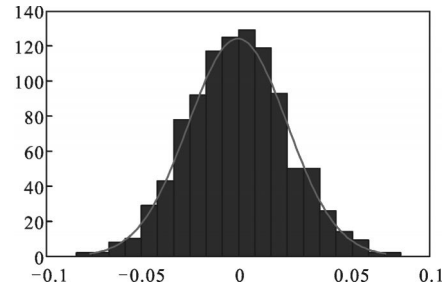


图 5 光谱维像移速度误差分布图

Fig.5 Distribution of spectral image motion error

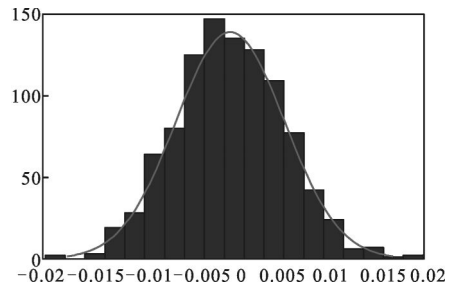


图 6 空间维像移速度误差分布图

Fig.6 Distribution of spatial image motion error

5 飞行成像试验

2013 年 12 月, 项目组在湖南衡阳开展了飞行成像试验, 考察仪器与遥感作业飞机、PAV30 平台、POS 系统集成工作的协调性。高光谱成像仪与 PAV30 平台集成安装, 如图 7 所示。



图 7 高光谱成像仪与 PAV30 平台集成

Fig.7 Hyperspectral imager platform integration with PAV30

图 8 是此次飞行成像试验中, 在成像区域获取的高光谱图像数据, 图 9 是成像区域对应的卫星遥感图像。从图中可以看出, 图像清晰、层次分明, 图像扭曲小, 成像效果较好, 说明所选的 PAV30 稳定平台能确保推扫成像期间的姿态稳定。通过后期的精细辐射定标、光谱定标和必要的集成工作后, 可进一步提高图像质量。



图8 成像区域 VNIR 伪彩色图像

Fig.8 VNIR pseudo-color image of imaging area



图9 成像区域卫星遥感图像

Fig.9 Satellite image of imaging area

6 结论

文中在利用齐次坐标变换法建立像移速度矢量的精确计算模型的基础上, 细分析了成像质量对姿态参数的要求及飞行姿态参数补偿残差对成像质量的影响, 研究了给定成像指标要求的飞行参数指标的分配问题, 并结合蒙特卡洛方法对误差指标进行了误差综合。最后飞行成像试验证明上述分析正确, 所选稳定平台能够满足姿态稳定性要求。

参考文献:

- [1] Li Wenming, Xu Zhengping, Chen Xihui, et al. Influence of aircraft sharp turns on the image quality of the aerial camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39: 29-33. (in Chinese)
李文明, 徐正平, 陈希惠, 等. 飞机大坡度转弯对航空相机成像的影响[J]. *光电工程*, 2012, 39: 29-33.
- [2] Wang Dejiang, Zhang Tao, Kuang Haipeng. Clocking smearing analysis and reduction for multi phase TDI CCD in remote sensing system[J]. *Opt Express*(S1094-4087), 2011, 19(6): 4868-4880. (in Chinese)
- [3] Doyle K B, Cerrati V J, Forman S E, et al. Optimal structural design of the airborne infrared imager [C]//SPIE, 1995, 2542: 11-32.
- [4] Richard Prelias. A proceedings of the wide-look-angle gimbal for airborne electro optical system [J]. *SPIE*, 1995, 1998: 104-111.
- [5] Xu Yongsan, Ding Yalin, Tian Haiying, et al. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1780-1783. (in Chinese)
许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 斜式状态下航空遥感器像移的计算与补偿 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15 (11): 1780-1783.
- [6] Liu Ligu. Research on the influence of the attitude change to the aerial push-brooming camera imaging quality and compensating method[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
刘立国. 姿态变化对推扫式相机成像质量影响分析与补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- [7] Zhong Weichao. The effect of spacecraft orbit and attitude parameters on optical imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
仲惟超. 航天器轨道和姿态参数对光学成像的影响分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] Wang Jiaqi. Optical Instrument Collectivity Design [M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 1998. (in Chinese)
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研究生部教材, 1998.
- [9] Yan Dejie, Xu Shuyan, Han Chengshan. Effect of aero-craft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16 (11): 2199-2203. (in Chinese)
闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2199-2203.
- [10] Feng Yutao, Xiang Yang. Effects of spectral position offset on radiance measurement of imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1083-1086. (in Chinese)
冯玉涛, 向阳. 光谱移位对成像光谱仪辐射测量的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1083-1086.
- [11] Wang Jing, Gao Limin, Yao Junfeng. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 388-393. (in Chinese)
王晶, 高利民, 姚俊峰. 机载测量平台中的坐标转换误差分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 388-393.