

## 载机偏航运动对大视场红外扫描装置成像质量影响的 仿真分析

董浩,刘会通

(天津航技术物理研究所,天津 300308)

**摘要:** 某航空大视场红外扫描装置采用 TDI-CCD 探测器、以整机摆扫工作方式扫描成像,由于扫描装置为滚动-俯仰结构的两轴稳定平台,对偏航扰动没有稳定作用,其成像质量易受载机偏航运动的影响。通过运动学分析方法建立扫描装置的视轴运动方程及视轴旋转约束条件,得出不影响成像质量的载机偏航运动范围。在载机实际飞行数据输入条件下进行仿真验证,当载机直线飞行时,其偏航运动不影响成像质量。飞行试验验证表明:摆扫扫描图像清晰,航空大视场扫描装置具有良好的载机偏航运动适应性。

**关键词:** 航空对地观测; 扫描装置; 时间延迟积分; 载机偏航运动; 两轴稳定  
**中图分类号:** TP73   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0810-06

## Simulation analysis of large FOV infrared scanning imaging quality on aircraft yawing rotation

Dong Hao, Liu Huitong

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** An aviation large field of view(FOV) infrared scanning device employs TDI-CCD detector and performs a complete appliance scanning manner, its imaging quality is influenced by aircraft yawing rotation. The scanning device line of sight (LOS) rotation equation and LOS rotation constraint equation were established through kinematic analysis. Thus the aircraft yawing rotation bound was obtained which allowed a distinct image quality. Simulation was carried out on actual flight data, it shows an excellent image quality when aircraft makes a straight flight. The aircraft yawing rotation influence to large FOV scanning is acceptable.

**Key words:** aviation observation of the earth; scanning device; TDI-CCD;  
aircraft yawing rotation; two-axis stabilization

收稿日期:2014-07-12; 修订日期:2014-08-18

基金项目:国家高分专项某项目

作者简介:董浩(1980-),男,博士,主要从事航空扫描稳定平台方面的研究。Email:donghao-email@163.com

## 0 引言

在航空高分辨率对地观测领域, 大口径(200 mm 以上) 转镜或摆镜扫描方式经西方国家经过分析和工程应用后已经摒弃<sup>[1-3]</sup>, 而整机摆扫方式在 20 世纪 90 年代已经实现, 譬如美国“全球鹰”无人机的光电侦察载荷 (ISS)、RAPTOR DB-110 多光谱/多光路相机, 以色列的 LOROS 光电吊舱以及高端机载光电设备等<sup>[4-6]</sup>。在整机摆扫方式的扫描仪中, 根据探测器不同可分为凝视成像及 TDI 成像两种方案, 其中凝视成像方案需在曝光时刻维持物像相对静止, 这一条件可通过前置快速反射镜进行“反扫”获得, 而 TDI 成像利用其器件本身的像移补偿特性, 可获得运动中的清晰图像, 形成真正意义上的“整机扫描”。二者相比, 采用 TDI 成像方案具有以下优点: (1) 成像器结构简单、体积和质量小; (2) 摆扫周期内有效成像积分时间长, 可在低照度条件下获得高灵敏度、高空间分辨率的图像<sup>[7]</sup>; (3) 单幅扫描条带内成像区域无冗余, 降低了探测器读出速率要求, 有利于大视场高分辨率成像。目前, 高分辨率数字遥感相机多采用时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD), 而且向大视场、宽覆盖的方向发展<sup>[8]</sup>。

整机扫描装置的扫描机构多采用两轴滚动-俯仰结构<sup>[9-10]</sup>, 滚动轴做摆扫运动, 俯仰轴做像移补偿运动。滚动、俯仰方向均具备稳定功能, 可有效抑制载机的滚动、俯仰姿态扰动, 但由于扫描机构无航向轴, 不具备抑制载机偏航运动的能力, 扫描装置的成像质量受到载机偏航运动的制约, 当偏航角速度过大时, 无法满足清晰成像的要求。此外, 对于采用 TDI-CCD 器件的成像器, 滚动通道的扫描速率失配、俯仰通道的像移补偿精度以及 TDI CCD 电荷转移均为制约 TDI-CCD 成像质量的因素<sup>[11-13]</sup>。

相对运动引起的像移通常按前向/俯仰及摆扫二维方向进行分析与补偿<sup>[14-15]</sup>, 文中针对航空大视场扫描成像的载机偏航运动适应性问题进行分析, 因此假设: (1) 扫描装置的滚动运动扫描速率与电子转移频率精确匹配; (2) 俯仰运动完全补偿载机前向运动带来的像移, 即忽略滚动、俯仰速率失配的影响。由于影响成像质量的直接因素为 TDI-CCD 视轴 (LOS) 运动速度, 首先建立航空大视场红外扫描装置的视轴运动方程, 然后对扫描装置的载机偏航运动

适应性进行分析。

## 1 扫描装置的视轴运动方程

大视场红外扫描装置采用“滚动-俯仰”两轴结构, 扫描过程中框架转角时时变化, 视轴旋转角速度不仅与载机偏航角速度有关, 还受扫描角速度、载机俯仰运动角速度的影响。首先给出坐标系定义, 如图 1 所示, 飞机坐标系为  $Ox_{ac}y_{ac}z_{ac}$ , 滚动框坐标系为  $Ox_p y_p z_p$ , 俯仰框坐标系为  $Ox_r y_r z_r$ , 滚动框坐标系与基座坐标系夹角为  $\theta_r$ , 俯仰框坐标系与滚动框坐标系夹角为  $\theta_p$ ,  $z_p$  即为扫描装置视轴, 视轴角速度等于俯仰环角速度。

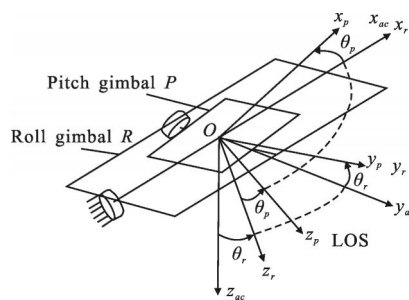


图 1 扫描装置结构框图及坐标系

Fig.1 Scanning device structure diagram and coordinate

按被控量列写两轴平台框架运动学方程, 为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ \omega_{ry} \\ \omega_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_r & S\theta_r \\ 0 & -S\theta_r & C\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{acx} \\ \omega_{acy} \\ \omega_{acz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_p & 0 & -S\theta_p \\ 0 & 0 & 0 \\ S\theta_p & 0 & C\theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ \omega_{ry} \\ \omega_{rz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{py} \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

整理得平台视轴运动学方程:

$$\omega_{LOS} = \begin{bmatrix} S\theta_p S\theta_r \omega_{acy} - S\theta_p C\theta_r \omega_{acz} + C\theta_p \omega_{rx} \\ \omega_{py} \\ -C\theta_p S\theta_r \omega_{acy} + C\theta_p C\theta_r \omega_{acz} + S\theta_p \omega_{rx} \end{bmatrix} \quad (2)$$

可知扫描角速度为:

$$S\theta_p S\theta_r \omega_{acy} - S\theta_p C\theta_r \omega_{acz} + C\theta_p \omega_{rx} = \omega_0$$

式中:  $\omega_{acy}$ 、 $\omega_{acz}$  分别为载机的俯仰、偏航角速度;  $\theta_p$ 、 $\theta_r$  分别为俯仰框架角、滚动框架角;  $\omega_{py}$ 、 $\omega_{rx}$  分别为俯仰框架角速度、滚动框架角速度;  $S$ 、 $C$ 、 $T$  分别代表  $\sin$ 、 $\cos$ 、 $\tan$ 。则滚动框架角速度为:

$$\omega_{rx} = \frac{\omega_0}{C\theta_p} + T\theta_p C\theta_r \omega_{acz} - T\theta_p S\theta_r \omega_{acy}$$

视轴旋转角速度为:

$$\begin{aligned} \omega_{LOS} = & -C\theta_p S\theta_r \omega_{acy} + C\theta_p C\theta_r \omega_{acz} + S\theta_p \omega_x = \\ & T\theta_p \omega_0 - \frac{S\theta_r}{C\theta_p} \omega_{acy} + \frac{C\theta_r}{C\theta_p} \omega_{acz} \end{aligned} \quad (3)$$

可见视轴旋转角速度与扫描角速度、俯仰滚动框架角、载机俯仰偏航角速度有关,与载机滚动角速度无直接关系。

## 2 载机偏航运动适应性分析

偏航角变化能造成图像的旋转,如果偏航角速度较大,则有可能影响 TDI 探测器扫描成像质量。

### 2.1 TDI-CCD 视轴旋转速度约束

常用的评价是否影响成像质量的准则有:(1) MTF 计算方法,“调制传递函数下降 2% 对成像质量无本质影响,可以作为像移补偿残差的计算约束,对于 96 级 TDI-CCD 而言,MTF 下降 2% 时的像移补偿残差为 0.2 个像元<sup>[21]</sup>”;(2) 工程上以像移残差不超过 1/3 个像素作为不影响成像质量的依据。文中分析忽略了扫描速率失配的影响,因此以条件相对严格的 MTF 计算方法作为判据,取像移补偿残差不超过 0.2 个像元,确定不影响摆扫成像质量的载机偏航运动速度范围,如果超过 0.2 像素则认为造成当前列图像模糊。

以 96 级 TDI CCD 成像为例进行分析,如图 2 所示。设每个像元的长度为  $d$ ,则探测线列长度  $L=N \times d$ ,其中  $N$  为探测器总行数,根据几何关系可以得到扫描列周期内最大允许角偏差  $\theta$ ,满足约束:

$$\begin{cases} \Delta s = \frac{1}{2} L \sin \theta < 0.2d \\ \Delta L = \frac{1}{2} L (1 - \cos \theta) < 0.2d \end{cases} \quad (4)$$

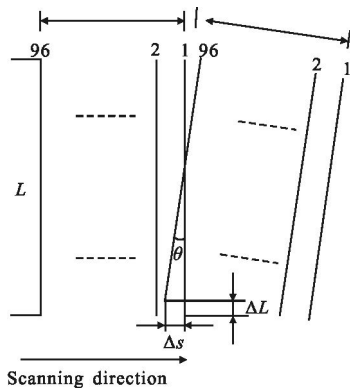


图 2 视轴旋转引起 TDI CCD 像移原理图

Fig.2 TDI CCD image motion caused by LOS rotation

由于是小角度,  $\Delta L \cdot \Delta s$  且  $\theta \approx \sin(\theta)$ , 探测器首末列旋转角度:

$$\theta < \frac{0.2d}{L/2} = \frac{0.4d}{Nd} \quad (5)$$

设光路焦距为  $f$ , 扫描方向首末两条线列夹角为:

$$\alpha = 96d/f \quad (6)$$

设扫描速度(像光斑在焦平面移动角速度)为  $\omega_0$ , 则单列图像的扫描列周期为:

$$\tau = a/\omega_0 = 96d/(f\omega_0) \quad (7)$$

由于单列图像扫描周期为毫秒量级,期间大惯量平台的视轴运动速度变化很小,可视为匀速,则允许视轴旋转角速度:

$$\omega_{LOS} = \frac{\theta}{\tau} < \frac{0.4d}{Nd} \frac{f\omega_0}{96d} \quad (8)$$

可见视轴旋转角速度约束与探测器像元长度、线列数、TDI 级数、光路焦距及扫描角速度有关。

### 2.2 偏航角速度适应性计算

计算大视场摆扫系统的载机偏航角速度适应性,由公式(1)和(8)可知,只要  $\max\{|\omega_{LOS}|\}$  满足公式(8)的约束条件,不影响 TDI 探测器成像质量,其中

$$\max\{|\omega_{LOS}|\} \leq \frac{|S\theta_r \omega_{acy} + C\theta_r \omega_{acz}| + |S\theta_p \omega_0|}{C\theta_p} \quad (9)$$

设定航空大视场扫描成像参数:像元长度  $d=15 \mu\text{m}$ ,线列数  $N=2048$ ,光路焦距  $f=700 \text{ mm}$ ,扫描角速度  $\omega_0=62.5 (^{\circ})/\text{s}$ 。

由公式(8)可知,允许视轴旋转速度:

$$\omega_{LOS} = \frac{\theta}{\tau} < \frac{0.4d}{Nd} \frac{f\omega_0}{96d} = 5.934 (^{\circ})/\text{s} \quad (10)$$

因此,只要  $\max\{|\omega_{LOS}|\}$  不大于  $5.934 (^{\circ})/\text{s}$  即可保证图像清晰。扫描过程中框架角满足  $\theta_p < 4.5^{\circ}$ 、 $\theta_r < 60^{\circ}$ ,只要有

$$\max\{|\omega_{LOS}|\} \leq 5.934 \quad (11)$$

便满足成像清晰条件。由公式(9)可知:

$$|S\theta_r \omega_{acy} + C\theta_r \omega_{acz}| < 2.11 \quad (12)$$

由于平稳飞行情况下载机俯仰角速度  $\omega_{acy}$  小于  $1.5 (^{\circ})/\text{s}$ ,有

$$\omega_{acz} < 2.11/C\theta_r - 1.5|T\theta_r| \quad (13)$$

以框架滚动角  $\theta_r$  为自变量,绘制不等式右边函数曲线,如图 3 所示,只要飞机偏航角速度在曲线下方即可保证成像清晰。

飞机平稳飞行状态下偏航角速度  $\omega_{ac}$  小于  $1.5 (^{\circ})/\text{s}$ ,基本处于曲线下方,只有同时满足以下三个条件或

某一条件大幅偏离该范围时才对成像质量存在影响:(1) 滚动框架角在  $38^{\circ}\sim 50^{\circ}$  范围内;(2) 俯仰角不小于  $3.5^{\circ}$ ;(3) 载机俯仰偏航角速度均不小于  $1.5^{\circ}/s$ 。

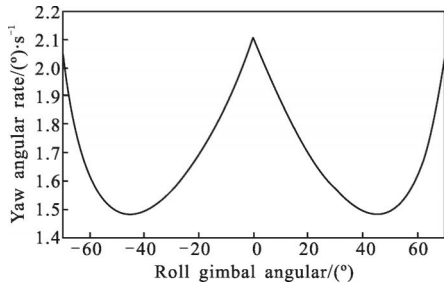


图 3 保证成像清晰的最大偏航角速度

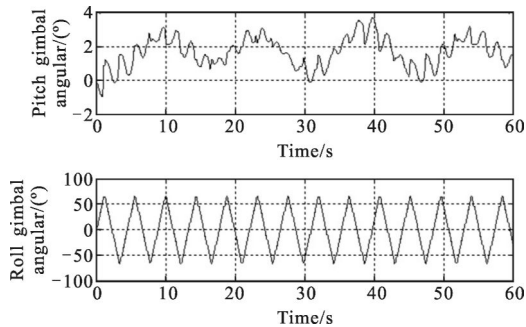
Fig.3 Maximum yaw angular rate for distinct imaging

同时满足这三个条件或某一条件大幅偏离的情况出现的概率较小,所以在偏航角速度不大于  $1.5^{\circ}/s$  时,TDI 探测器的成像质量所受影响可以忽略。对恶劣条件下的飞行任务或者飞行机动状态下,偏航及俯仰运动会导致视轴旋转速度过大从而影响成像质量。

### 3 仿真验证

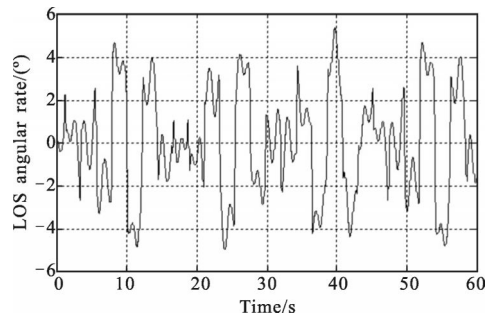
#### 3.1 载机正弦运动时的仿真验证

考察飞机的三个姿态角变化率为正弦情况下的视轴旋转角速度:取俯仰角、滚动角变化率为幅值  $1.5^{\circ}/s$ 、频率  $0.5\text{ Hz}$  的正弦信号,取偏航角变化率为幅值  $1.5^{\circ}/s$ 、频率  $1/6\text{ Hz}$  的正弦信号。扫描过程中滚动、俯仰角变化范围如图 4(a)所示,滚动角在  $\pm 70^{\circ}$  之间变化,俯仰角在  $0^{\circ}\sim 4^{\circ}$  之间变化。视轴旋转速度如图 4(b)所示,可见视轴最大旋转速度小于  $5.7^{\circ}/s$ ,不影响成像质量。



(a) 俯仰、滚动框架角

(a) Pitch and roll gimbal angular



(b) 视轴旋转角速度

(b) LOS rotation angular rate

图 4 载机正弦运动时的视轴运动仿真曲线

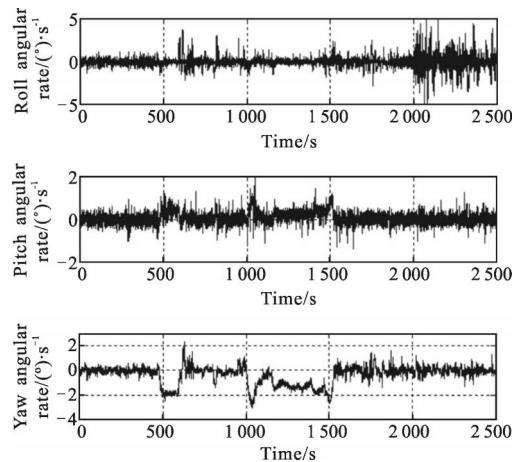
Fig.4 LOS motion simulation on sinusoidal motion

因此,在载机正弦运动时造成视轴旋转角速度小于  $\pm 5.7^{\circ}/s$ ,由前文计算可知该角速度小于  $5.93^{\circ}/s$ ,对 TDI 成像的影响可以忽略。

#### 3.2 载机实飞数据输入时的仿真验证

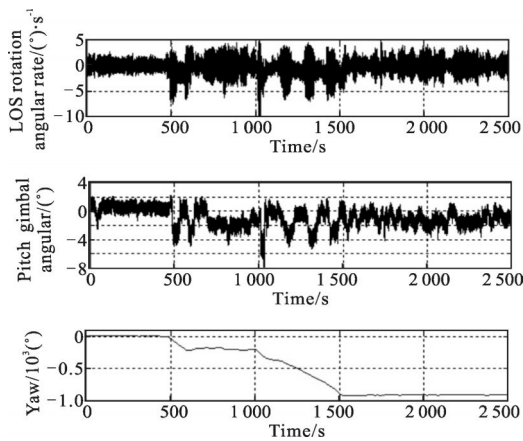
将载机实际飞行数据作为输入,2500 s 内载机的三个姿态角速度曲线如图 5(a)所示,偏航角如图 5(b)所示,可见 2000~2500 s 滚动角速度较大,0~500 s、700~1000 s、1600~2500 s 三段时间内载机直飞,其余时间载机做盘旋运动,直飞时间段内俯仰角速度小于  $1.5^{\circ}/s$ ,偏航角速度小于  $1.5^{\circ}/s$ 。由图 5(b)可知载机直飞时间内俯仰框架角不超过  $\pm 3^{\circ}$ ,视轴旋转角速度小于  $5^{\circ}/s$ ;在 2000~2500 s 滚动角速度较大的时间段内,视轴角速度与其余直飞时间段不存在明显变化,视轴旋转角速度与载机滚动角速度无关。

在 500~700 s、1000~1500 s 两个时间段内,载机



(a) 载机三个姿态角速度实测曲线

(a) Actual test curves of aircraft's three attitude angular velocity



(b) 视轴运动

(b) LOS motion

图 5 载机实际运动下的视轴运动仿真曲线

Fig.5 LOS motion simulation on aircraft actual motion

做盘旋运动,偏航角速度超过  $1.5 (^{\circ})/s$ , 约为  $2\sim 4 (^{\circ})/s$  且俯仰框架角较大,此时视轴旋转速度超过  $6 (^{\circ})/s$ , 将引起成像质量下降。

因此,在载机直飞情况下,其俯仰、偏航角速度小于  $1.5 (^{\circ})/s$ ,引起的视轴旋转速度小于  $5 (^{\circ})/s$ ,不影响扫描成像质量;而在载机做盘旋运动时,由于载机偏航角速度较大,扫描成像会出现模糊。

#### 4 飞行试验

给出整机扫描飞行试验的单幅扫描图像,如图6所示,对应的载机航向向上,摆扫方向向右,可见整幅扫描条带连续、清晰,无拼接线现象。

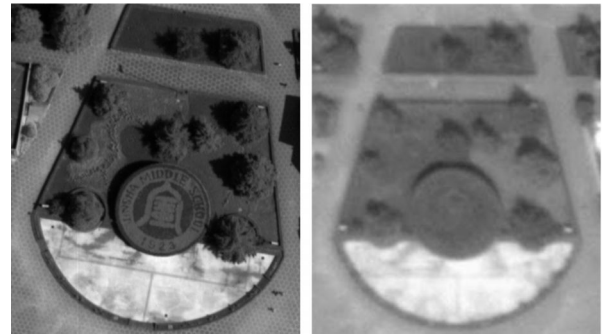


图 6 扫描试验图像

Fig.6 Scanning test figure

取图中白色框内区域及同一位置的 Google Earth 高清图进行对比,如图7所示,TDI 整机扫描图像中“JINSHA MIDDLE SCHOOL 1923”几个字清晰可见。对比可见,扫描图像更加清晰,细节丰富。

通过实际飞行试验验证“滚动-俯仰”结构的两轴 TDI 整机扫描装置,可清晰成像,具有良好的载机偏航运动适应性。



(a) TDI 摆扫扫描图像

(b) Google Earth 地图

(a) TDI sweep figure

(b) Google Earth map

图 7 图像对比

Fig.7 Figures contrast

#### 5 结论

对航空大视场扫描成像的载机偏航角速度适应性进行了理论分析,建立了“滚动-俯仰”结构两轴整机扫描装置的视轴运动模型,视轴旋转角速度与扫描角速度、俯仰框架角、载机俯仰角速度、载机偏航角速度有关,与载机滚动角速度无关。

通过计算及仿真验证可知,扫描角速度  $62.5 (^{\circ})/s$ 、俯仰框架角小于  $3.5^{\circ}$ 、载机偏航角速度小于  $1.5 (^{\circ})/s$  时,带来的像移不大于 0.2 个像素,不影响成像质量,可在载机直飞阶段清晰成像,经实际飞行试验验证,航空大视场红外扫描成像装置具有良好的载机偏航运动适应性。

#### 参考文献:

- [1] Sementelli R G. Litton itek optical systems [C]//SPIE, 1995, 2555: 222-231.
- [2] Serge Larroque. Thalès optronique [C]//SPIE, 2002, 4824: 61-71.
- [3] Petrushevsky V. ELOP electro optics industries [C]//SPIE, 2003, 4820: 607-617.
- [4] Stuart D M. Sensor design for unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Proceedings*, 1997, 3: 285-295.
- [5] Riehl Ken, Maver Lawrence A, Sementelli Richard G. The Raytheon DB-110 sensor: four cameras in one package[R]. ADA 390184, 1999: 1-17.
- [6] Vladimir Petrushevsky. High resolution, long range oblique IR imaging from an airborne platform electro-optical and infrared systems[C]//SPIE, 2006, 6395: 63950O-1-10.
- [7] Wang Dejiang, Kuang Haipeng, Cai Xichang, et al. Digital

- implementation of forward motion compensation in TDI – CCD panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2465–2472. (in Chinese)
- 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2465–2472.
- [8] Qu Hongfeng, Wang Xiaodong, Xu Shuyan, et al. Anti-jamming design for multi-velocity imaging mode of multiple TDI CCDs mosaic remote camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1026–1032. (in Chinese)
- 曲洪丰, 王晓东, 徐抒岩, 等. 多 TDI CCD 拼接遥感相机异速成像抗干扰设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1026–1032.
- [9] Vladimir Petrushevsky, David Tsur. Condor TAC: EO/IR tactical aerial reconnaissance photography system [C]//SPIE, 2012, 8360: 836003–1–8.
- [10] Masten M K. Inertially stabilized platforms for imaging optical systems[J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 2008, 28(1): 47–64.
- [11] Yan Dejie. Xu Shuyan, Han Chengshan. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2219–2203. (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): 2219–2203.
- [12] Wu Hongsheng, Pan Ning, Zhai Linpei. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6): 545–549. (in Chinese)
- 吴宏圣, 潘凝, 翟林培. TDI CCD 全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 545–549.
- [13] Wang Dejiang, Dong Bin, Lin Wenming, et al. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2500–2505. (in Chinese)
- 王德江, 董斌, 李文明, 等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2500–2505.
- [14] Zhang Yuxin, Liu Yu, Ge Wenqi. Development and prospect of image motion compensation technology [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3 (2): 112–118. (in Chinese)
- 张玉欣, 刘宇, 葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 112–118.
- [15] Li Weixiong, Yan Dejie, Wang Dong. Image motion compensation method of high resolution space camera's imaging with pitch angle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2442–2448. (in Chinese)
- 李伟雄, 闫得杰, 王栋. 高分辨率空间相机俯仰成像的像移补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2442–2448.