

文章编号 1004-924X(2009)02-0453-07

推扫式航空遥感器像移补偿精度的分析

许永森^{1,2}, 丁亚林¹, 田海英¹, 惠守文¹, 李友一¹, 董 斌^{1,2}

(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 研究生院, 北京 100039)

摘要:为分析飞行器的速度、航高、姿态角与姿态变化对推扫式航空遥感器成像质量的影响,采用光线矢量与光轴旋转变换相结合的方法建立了系统的像移模型,计算遥感器像移补偿的精度。分析了平移与旋转运动所引起像移的特点,通过运动的分解建立了推扫式航空遥感器的像移模型;以两组工作参数为条件,分析速高比、姿态角与姿态变化对像移的影响,并提出相应的像移补偿方法。应用蒙特卡罗法,依据与模型相关变量的误差分配,计算推扫式航空遥感器像移补偿的精度。在满足表 3 的误差要求,速高比为 0.3~0.5(1/s),TDI 基数不超过 32 级的情况下,像移补偿残差的 3 σ 值为 16 μm ,达到了遥感器的指标要求。

关键词:推扫式航空遥感器;像移补偿;误差分析;蒙特卡罗法

中图分类号:V243.5;TP73 **文献标识码:**A

Analysis of image motion compensation accuracy for aerial push-broom sensor

XU Yong-sen^{1,2}, DING Ya-lin¹, TIAN Hai-ying¹, HUI Shou-wen¹, LI You-yi¹, DONG Bin^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to analyze the effects of the speed, attitude and posture change of aircraft on the image quality of push-broom imaging sensor, an image motion model is established to calculate the accuracy of image motion compensation by combining light vector with optical axis revolution. The characteristics of image motion caused by translation and rotation are analyzed, and the image motion model of push-broom imaging sensors is established by decomposing the movement. With two groups of parameters, the influence of aircraft motion on image motion is analyzed and the method of image motion compensation is given. The accuracy of image motion compensation is calculated based on error budget of variable with Mont Carlo method. While the high-speed(v/H) ratio is 0.3~0.5(1/s) and the TDI stage is no more than 32, the 3 σ value of image motion compensation (IMC) error is 16 μm , which can satisfy the requirement of remote sensor.

Key words: push-broom aerial sensor; image motion compensation (IMC); error analysis; Mont Carlo method

收稿日期:2008-07-18;修订日期:2008-11-03.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. ZJ99130B)

1 引言

推扫式航空遥感器工作过程中,飞行器的运动状态(包括飞行速度、航度、姿态角、姿态运动速率等)会影响遥感器的成像质量^[1-3]。为了提高遥感器的动态分辨率,需要进行像移补偿。像移补偿的前提是要准确地计算像移,目前计算像移的方法主要有矢量分解法与坐标变换法。矢量分解法^[9]具有较好的实时性,但只能计算像面中心处的像移,所以适用于视场角较小的遥感器;坐标变换法虽然计算的精度较高,但计算量大、实时性差。

本文通过分析运动产生像移特点,应用光线矢量与光轴旋转变换相结合的方法^[3-4],在考虑偏流姿态角的条件下建立了系统的像移模型;并应用蒙特卡罗法对模型的相关变量进行误差分配^[7],分析推扫式航空遥感器像移补偿的精度。该方法实时性好、计算精度高,具有一定的理论意义与工程实用价值。

2 像移产生的原因与特点

光学遥感器成像是将空间物体 P 投影在二维成像介质上,如图 1 所示,其中 f 为光学系统的焦距, l 为 P 点相对于光学系统的物距, z 为光轴的单位矢量, α 为光学系统的半视场角, r 与 r_i 分别为物点 P 与共轭像点 P' 所对应的光线矢量;当光学系统与物体 P 间发生相对运动时,焦面上共轭点 P' 在成像介质上运动产生像移。

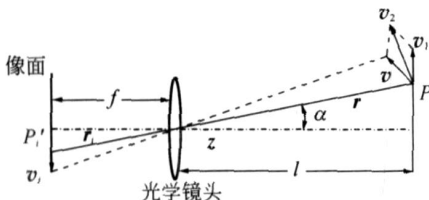


图 1 光学成像示意图

Fig. 1 Sketch of optical imaging

在理想的成像条件下,可将物体与光学系统间的相对运动 v 分解为两个运动矢量 v_1 与 v_2 ,其中 v_1 为物体相对于光轴的平动矢量, v_2 为物体与光轴间的转动矢量。前一种运动在物距不变的条

件下,光学系统的垂轴放大倍率不发生变化;后一种运动由于运动方向相对于光轴方向不断地改变,引起物距的变化,使光学系统的垂轴放大倍率也随之改变。由于两种运动对光学系统垂轴放大倍率的影响不同,因此它们像移速度的计算方法也不相同。理想光学系统成像公式:

$$\frac{r_i}{f} = \frac{r}{r \cdot z} \quad (1)$$

由运动速度 v 引起的像移速度 v_i 可由式(2)计算:

$$\frac{v_i}{f} = \frac{(r \cdot z) \cdot v - (r \cdot z) \cdot r}{(r \cdot z)^2} = \frac{(r \cdot v) \cdot z}{(r \cdot z)^2} \quad (2)$$

其中, $v_i = \frac{dr_i}{dt}$, $v = \frac{dr}{dt}$.

经矢量分解,与 v_1 , v_2 所对应的像移速度 v_i 和 v_2 可按式(2)计算,得式(3)与式(4):

$$v_i = \frac{f}{l} v_1 \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{f \cdot v_2}{r \cdot \cos^2} = \frac{f}{\cos^2} \quad (4)$$

式(4)中 $\frac{v_2}{r}$ 为物体 P 相对于光轴转动的角速。

对比上述像移速度的计算公式可知,像移速度大小,除了与运动的形式和运动速度的大小有关之外,还与遥感器光学系统的视场角以及视场内的垂轴放大倍率密切相关。当遥感器视场内的垂轴放大倍率相同时,由 v_1 引起的像移速度在像面各点处均相等;而在小视场条件下由 v_2 引起的像移速度可按照视场中心处的像移进行计算。

3 推扫式航空遥感器的像移模型

通过对运动产生像移的分析,归纳出两种不同运动形式下像移速度的计算方法。要建立推扫式遥感器的像移模型,需要在三维空间内描述光轴与被成像物体间的相对运动,此外还要考虑遥感器光学系统的垂轴放大倍率。

应用光线矢量和光轴旋转变换相结合的方法,根据理想光学系统的成像公式,通过物体坐标值的变化以及光轴的单位矢量在三维空间方向的改变,分别描述物体与光轴间的平移运动与旋转运动,另外由于飞机姿态角的存在也会对像移产生影响(本文主要考虑偏流姿态角),因此像移模

型还应包括飞行器的偏流角。

3.1 像移模型的坐标系选择

本文分析的是某型推扫式航空遥感器,可假定飞行器的机体坐标系与遥感器的坐标系重合;建立飞行器的航迹坐标系 S_K 与机体坐标系 S_B ,规定 S_K 与 S_B 的坐标原点与遥感器光学系统的主点相重合,如图 2 所示;坐标系 S_B 的 x 、 y 、 z 轴分别为飞行器的横滚轴、俯仰轴与偏航轴,其中 ϕ 、 γ 为飞行器绕 S_K 坐标系的 x_k 、 y_k 、 z_k 轴转动的角度。规定正对坐标轴逆时针旋转为正方向,横滚轴与俯仰轴所构成的 xoy 平面与地面平行;定义偏流角为航迹速度 v 与机体坐标系 xoz 平面的夹角, H 为飞行器的航高, f 为光学系统的焦距。

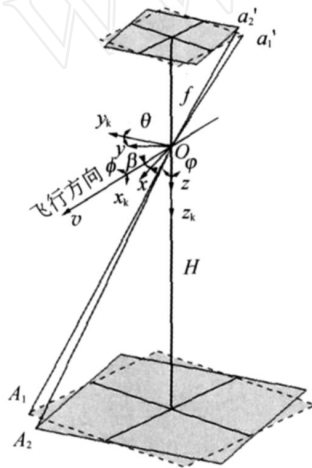


图 2 推扫式遥感器的坐标系

Fig. 2 Coordinate system of pushbroom remote sensor

3.2 像移模型的物像空间关系

理想状态下,像面 1 上任意点 a_1 在 S_K 下的

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi + \gamma) & -\sin(\phi + \gamma) & 0 \\ \sin(\phi + \gamma) & \cos(\phi + \gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过 A_2 坐标值的改变描述飞行器沿航迹的飞行,以光轴方向在空间范围内的变化描述飞机的姿态变化,从而实现遥感器与 A_2 间的运动分解。

为便于计算,将所有 S_K 下的坐标变换到 S_B 坐标系下,定义坐标系变换矩阵为 R_C ,且 $R_C = R^{-1}$,则 A_2 点变换到 S_B 坐标系下的坐标值为 R_C

坐标值为 $[x_1, y_1, -f]^T$,与其共轭的地面物点 A_1 的坐标为 $[X_1, Y_1, H]^T$ 。向量 oA_1 与 oA_2 可理解为光学系统像空间与物空间的光线矢量, $v_K = [0, 0, 1]^T$ 代表光轴方向上的单位矢量。由于飞行器工作中始终存在着偏流角,因此遥感器的实际像面 2 绕 S_K 坐标的 z_k 轴发生了旋转,则 a_2 在 S_K 下的坐标可通过像面 1 上与该点对应的 a_1 点绕 z_k 轴顺时针旋转 γ 角来表示^[1],依据坐标变换的定义可得坐标变换矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在 S_K 坐标系下与 a_2 共轭的点 A_2 的坐标值可以通过物像间的三角投影关系获得,如公式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \frac{H}{v_{1K} \cdot R [x_1, y_1, -f]^T} \times R \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于在 t 曝光时间内,飞行器沿航迹方向上的飞行使 A_2 点与光轴发生平移, A_2 在 S_K 下的坐标变化为 $[X_2, Y_2, H]^T - [v \times t, 0, 0]^T$;与此同时飞机姿态的不断变化使光轴的方向发生改变。为了论述的方便,将光轴绕 S_K 的 z_k 轴转动 γ 角表示为 $[0, 0, \gamma]$;飞行器的姿态变化使光轴绕 S_K 的 3 个坐标轴分别旋转了 ϕ 、 γ ,光轴在 S_K 下绕其坐标轴转过的角度可表示为 $[\phi, \gamma, \gamma + \gamma]$ 。定义 R 为光轴方向单位矢量的旋转变换矩阵,依据坐标变换的定义,光轴方向的单位矢量先绕 z 轴改变 γ ,而后绕 y 轴改变俯仰角 ϕ ,最后绕 x 轴改变横滚角 γ ^[4-7],变换矩阵 R 如式(7)所示。

($[X_2, Y_2, H]^T - [v \times t, 0, 0]^T$),经过曝光后与该点共轭的像 A_2 的坐标可由式(8)计算,式中 $v_{BK} = [0, 0, 1]^T$ 为坐标系 S_B 下光轴方向上的单位矢量; $v_{BK} \cdot R^{-1} [X_2 - v \times t, Y_2, H]^T$ 为光线矢量 oA_2 在光轴方向上单位矢量的投影,即物点 A_2 的成像物距; $-f / (v_{BK} \cdot R^{-1} [X_2 - v \times t, Y_2, H]^T)$ 的物理意义为该点处光学系统的垂轴放大

倍率^[4]。将 S_B 坐标系下曝光前后像面上所对应点的光线矢量做差值,可得到遥感器像面上各点的像移矢量,除以曝光时间 t 即为像移速度矢量。

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{-f}{v_{BK} \cdot R^{-1} [X_2 - v \times t, Y_2, H]^T} \times R^{-1} \begin{bmatrix} X_2 - v \times t \\ Y_2 \\ H \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.3 飞行器的运动状态对像移影响

设遥感器的焦距 $f = 150 \text{ mm}$, 视场角 $2\theta = 38^\circ$;取曝光时间为 10 ms , 飞行速度 $V = 300 \text{ m/s}$, 航高 $H = 1\,000 \text{ m}$ 。通过上述的像移模型在像面上取 121 个点,以两组工作参数为条件(见表 1),分析飞行器的速高比、偏流角以及姿态变化对像移的影响。其中 v_{im} 为像移速度的大小, ψ 为像移矢量与 S_B 坐标系 x 轴的夹角。

表 1 遥感器的工作参数

Tab. 1 Parameters of remote sensor

速高比	俯仰角速率	横滚角速率	偏航角速率	偏流角
$v/H/(1/s)$	Pitch/ $(^\circ/s)$	Roll/ $(^\circ/s)$	Yaw/ $(^\circ/s)$	$\psi/(^\circ)$
1	0.3	0	0	3.5
2	0.3	0.5	2.3	0.5

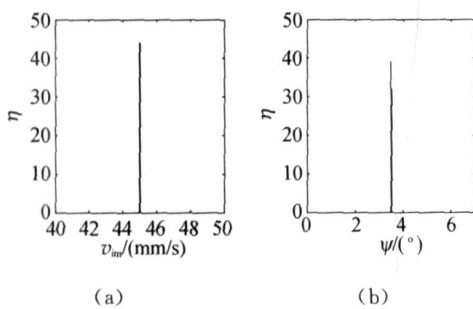


图 3 第一组参数下像移速度与夹角 ψ 的频率密度分布
Fig. 3 Histogram of image motion velocity and angle ψ in the first group of parameters

第一组参数主要考虑飞行器的速度、高度与偏流角对像移的影响,从图 3(a)中可知像移速度在整个视场内大小相等方向一致;由于偏流角的存在使像移速度的方向与 S_B 坐标系的 x 轴存在夹角,其大小等偏流角 ψ 如图 3(b);因此飞行器

的速度、高度、偏流角决定了前向像移^[4]的大小与方向。

第二组参数在前一组的基础上加入了飞行器的姿态变化。从图 4(a)中可知像移速度的大小分布于一定的区域之中,像移速度的方向也不完全相同如图 4(b)。因此飞行器的姿态变化使遥感器产生姿态像移^[6]的同时,也改变了像移在像面上分布的均匀性。

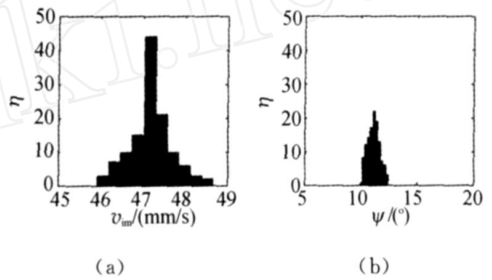


图 4 第二组参数下像移速度与夹角 ψ 的频率密度分布
Fig. 4 Histogram of image motion velocity and angle ψ in the second group of parameters

4 推扫式遥感器的像移补偿系统

通过对遥感器像移模型的分析,飞机的速度、高度、偏流角以及姿态运动影响着像移的大小与方向。像移的存在会影响遥感器的成像质量,因此要采用合理的方法进行像移补偿。

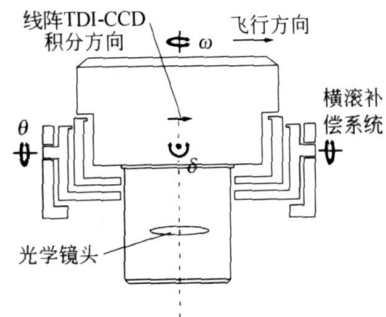


图 5 推扫式航空遥感器像移补偿示意图
Fig. 5 Image motion compensation system of push-broom remote sensor

该型遥感器采用三轴陀螺稳定平台与 TDI-CCD 相结合的方法实现像移补偿,如图 5 所示。三轴陀螺稳定平台的俯仰与横滚补偿机构用于补

偿飞机的俯仰与横滚姿态变化;偏流补偿机构用于补偿飞行器的偏流角与偏航姿态的变化,TDI CCD 的积分功能用于补偿遥感器的前向像移^[6]。

5 应用蒙特卡罗法分析推扫式遥感器的像移补偿精度

为了分析该型遥感器像移补偿系统的精度,

本节应用蒙特卡洛法,通过给出与模型相关的参数误差概率密度分布,计算遥感器的像移补偿残差。

5.1 数据准备

根据遥感器的像移模型,确定影响像移补偿误差的因素,以及各参数的误差定义与计算使用值(见表 2);生成随机数列 $H_j, v_j, \dots, \dot{\phi}_j (j = 1, 2, \dots, n, n$ 为采样数,取 $n = 2\ 000$)。

表 2 误差项的定义与计算使用值

Tab. 2 Definitions and values of error items

序号	误差变量名称	误差分布	单位	误差量(3 σ)	备注
1	航迹高程 H	正态分布	m	30	测量精度
2	航迹速度 v	正态分布	m/s	6	测量精度
3	飞机俯横滚速率 $\dot{\phi}$	正态分布	($^\circ$)/s	0.01	测量精度
4	飞机俯仰速率 $\dot{\theta}$	正态分布	($^\circ$)/s	0.01	测量精度
5	飞机偏航速率 $\dot{\psi}$	正态分布	($^\circ$)/s	0.01	测量精度
6	飞机的偏流角	正态分布	($^\circ$)	0.1	测量精度
7	遥感器焦距 f	正态分布	mm	0.5	测量精度
8	相机横滚补偿角速率误差 $\dot{\phi}$	正态分布	($^\circ$)/s	0.2	控制精度
9	相机俯仰补偿角速率误差 $\dot{\theta}$	正态分布	$^\circ$ /s	0.2	控制精度
10	相机偏航补偿角速率误差 $\dot{\psi}$	正态分布	($^\circ$)/s	0.2	控制精度
11	相机偏流角补偿误差	正态分布	($^\circ$)	0.3	控制精度

5.2 计算过程

(1) 依据遥感器的技术指标,确定一组工作参数的名义值,包括: v, H, f, t , 其余参数设置为零,通过本文的像移模型计算出用于补偿的像移矢量 v_0 。

(2) 将步骤 1 中的名义值与初始值,以及表 2 中的 11 个参数的误差随机数: $(H + H_j), (v + v_j), (f + f_j), (\dot{\phi} + \dot{\phi}_j), (\dot{\theta} + \dot{\theta}_j), (\dot{\psi} + \dot{\psi}_j), \phi_j = (\dot{\phi}_j \times t), \theta_j = (\dot{\theta}_j \times t), \psi_j = (\dot{\psi}_j \times t)$, 代入像移模型计算出实际状态下的像移矢量 v_j 。

(3) 通过步骤 1 与 2 中获得的像移矢量 v_0 与 v_j , 计算像移补偿残差 $v_{inc} = v_j - v_0$, 以及像移矢量角残差 α (v_j 与 v_0 间的夹角)。

根据上述的计算过程,计算在两组速高比参数下,TDI 级数分别为 32、24 时,像面中心处的像移补偿残差与像移矢量角残差。当各参数满足表 2 的误差要求时,像移补偿残差与像移矢量角误差的统计结果如表 3 所示;图 6 与图 7 为速高比为 0.5(1/s)、TDI 级数选为 24 时,像移矢量残差与

表 3 像移残差和像移矢量角误差统计结果

Tab. 3 Statistic results of image motion errors and shift angle errors

速高比 (1/s)	TDI 级数	像移残差 (3 σ)/ μ m	像移矢量角残差 (3 σ)/($^\circ$)
0.3	32	16	0.9
	24	15	0.8
0.5	32	13	0.6
	24	12	0.5

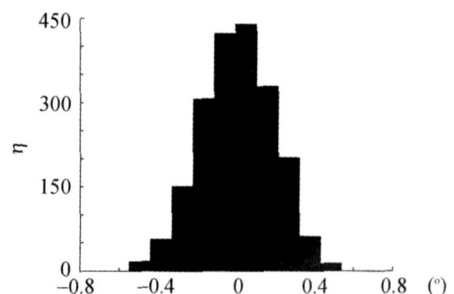


图 6 像移矢量角残差的频率密度分布

Fig. 6 Histogram of image motion angle shift error

像移矢量残差的频率密度分布。根据统计的结果,遥感器在能保证正常曝光的前提下应当优选较小的 TDI 级数。

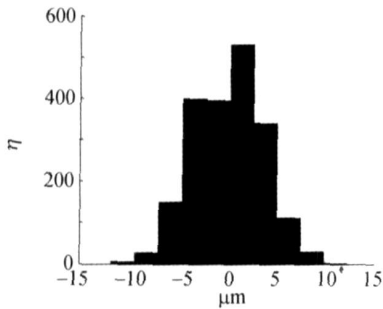


图 7 像移补偿残差的频率密度分布

Fig. 7 Histogram of image motion compensation error

参考文献:

- [1] LAREAU A G. Advancements in E-O framing [J]. *SPIE*, 1998, 3431 :96-107.
- [2] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation [J]. *SPIE*, 1993, 2023 :65-79.
- [3] MATHEWS B, ZWICKER T. Flight test results from the ultra high resolution, electro-optical framing camera for reconnaissance and other applications using a 9 216 pixel \times 9 216 pixel, wafer scale, focal plane array[J]. *SPIE*, 1999, 3751 :133-144.
- [4] 许永森,丁亚林,田海英,等.斜视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.
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Calculation and compensation tactics of the aerial remote sensor's image motion in oblique situation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (11) :1780-1783. (in Chinese)
- [5] 翟林培,刘明,修吉宏.考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14 (3) :490-494.
ZHAIL P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3) :490-494. (in Chinese)
- [6] 许永森,丁亚林,田海英,等.航空遥感器姿态像移方真分析[J]. *激光与红外*, 2007, 37 (12) :1303-1306.
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. The simulation of aerial remote sensor's gesture image motion [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37 (12) :1303-1306. (in Chinese)
- [7] 王家骥.光学仪器总体设计[M].长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材,1998.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)
- [8] LIGHT D. An airborne direct digital imaging system [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001 (11) :1299-1305.
- [9] 刘明,吴宏圣,匡海鹏,等.航相机的像移补偿方法及应用[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12 (4) :30-34.
LIU M, WU H SH, KUANG H P, *et al.*. Method and application of image motion compensation in aerospace camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12 (4) :30-34. (in Chinese)

6 结 论

本文通过对运动的分解,分析了两种不同运动形式所产生的像移特点;针对推扫式航空遥感器,应用光线矢量与光轴旋转变换相结合的方法,建立了遥感器的像移模型;通过对与像移模型相关的参数进行误差分配,运用蒙特卡洛法计算像移矢量的残余误差。经计算像移补偿残差的 3 值为 $16 \mu\text{m}$,满足遥感器的指标要求。

本文的分析内容与分析方法也适用于其它类型的航空遥感器。

作者简介:



许永森(1981-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事航空遥感器的研究。E-mail:pml3l@sina.com



丁亚林(1964-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事航空遥感器稳像技术的研究。E-mail:dinygyl1964@sohu.com

田海英(1975-),女,山西汾阳人,博士,副研究员,主要从事航空相机的研究。E-mail:thygzjhj_74@21cn.com

惠守文(1974-),男,吉林白城人,副研究员,主要从事航空相机的研究。E-mail:hsw_1@sohu.com

李友一(1968-),男,辽宁新宾人,副研究员,主要从事航空相机的研究。E-mail:Lyy_980205@yahoo.com

董 斌(1980-),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事航空相机的结构设计工作。E-mail:dwz_863@126.com

下期预告

高速 CCD 图像数据光纤传输系统

张 达^{1,2},徐抒岩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. 中国科学院研究生院,北京 100039)

提出了一种多路高速 CCD 图像数据光纤并行传输系统,并应用于空间遥感相机中。设计并实现了单路有效数据率最高可达 1.28 Gb/s 的光纤传输通道。阐述了系统设计思想,光纤传输通道结构,并对其中的关键技术高速总线接口、高速串行光电接口等进行了详细分析。实际完成了 5 通道 TDICCD 图像数据光纤并行传输系统,总有效数据率高达 5.7 Gb/s。通过实验证明该系统工作稳定可靠,实时传输效果好,无误码,满足了高速多通道 CCD 图像数据的高速率,远距离传输要求。