

文章编号: 0253-2239(2004)12-1585-5

# 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型

王家骥 于 平 颜昌翔 任建岳 何 斌

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 随着地面影像分辨力愈来愈高的要求, 航天光学遥感器实时精确补偿摄影时地物产生的像移, 已成为必需解决的关键技术之一。论述了航天光学遥感器在对星下点摄影时, 通过建立从地面景物到像面的七个坐标系, 进行 14 次线性变换, 获得了具有 15 个参量的像面位置方程、像面速度方程, 推导出像面上像移速度矢的计算公式, 对影响像移速度矢的 11 个参量进行误差分配, 以及应用蒙特卡罗法(统计试验法)进行误差综合。该理论方法已得到了实际应用, 从获得的遥感图像达到的分辨力、奈奎斯特(Nyquist)频率处的传递函数、信噪比和平均灰度层次均充分证明了该研究结果的正确性。

**关键词:** 应用光学; 遥感; 空间光学遥感器; 像移速度矢计算; 误差分配; 蒙特卡罗法

中图分类号: TP70 文献标识码: A

## Space Optical Remote Sensor Image Motion Velocity Vector Computational Modeling

Wang Jiaqi Yu Ping Yan Changxiang Ren Jianyue He Bin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy  
of Sciences, Changchun 130033)

(Received 13 August 2004; revised 17 September 2004)

**Abstract:** For space optical remote sensor (SORS) with either film or TDI-CCD imaging, to achieve higher resolution requires more accurate real-time image motion compensation. This primarily depends on real-time computation of the image motion velocity vector (IMVV) and error budget and synthesis on related parameters. An effective modeling scheme is introduced and the derivation of IMVV equation, error budget and synthesis by Monte-Carlo method are presented in detail. This total solution was applied to SORS system field test and has been confirmed to be very accurate based on the resolution, transfer function at Nyquist frequency, signal-to-noise ratio and average gray scale of the captured images.

**Key words:** applied optics; remote sensing; space optical remote sensor; image motion velocity vector; error budget; Monte-Carlo method

## 1 引 言

无论是胶片画幅式或者是 TDI CCD 推扫式的航天光学遥感器, 随着地面影像分辨力愈来愈高的要求, 用于实时地精确补偿摄影时地物产生的像移, 已成为必需解决的关键技术之一<sup>[1,2]</sup>。精密的像移补偿首先涉及到像移速度矢的实时计算和影响像移速度矢诸参量的精度分配和误差合成(即估值误差

分析)<sup>[3,4]</sup>。本文就星下点摄影时, 通过建立从地面景物到像面的七个坐标系, 进行 14 次线性变换, 构造 15 个参量的像面位置方程、像面速度方程, 推导出像面上像移速度矢的计算公式, 并对影响像移速度矢的 11 个参量进行误差分配, 以及应用蒙特卡罗法(统计试验法)进行误差综合<sup>[5~9]</sup>。

## 2 像移速度矢计算公式推导

### 2.1 坐标系定义

从地面景物到光学遥感器的坐标变换过程中,

E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2004-08-13; 收到修改稿日期: 2004-09-17

共涉及七个坐标系。各坐标系定义如下(全部采用右手系,如图 1)。

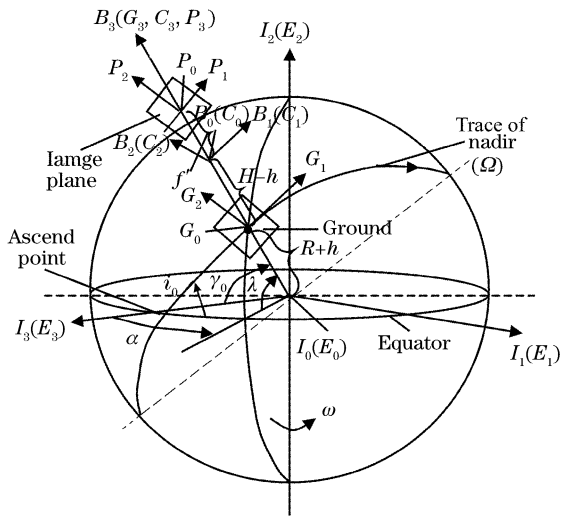


Fig. 1 Geographical relation of optical remote sensor when imaging nadia

2.1.1 地心惯性坐标系  $I(I_1, I_2, I_3)$

原点在地心处,  $I_2$  轴指向北极,  $I_3$  轴为航天器的轨道平面和赤道面的交点,  $I_1$  轴垂直  $I_2$  和  $I_3$  两轴形成的平面, 该坐标系保持惯性空间。

2.1.2 地球坐标系  $E(E_1, E_2, E_3)$

该坐标系固联于地球, 原点与  $I$  系原点重合,  $E_2$  指向北极, 与  $I_2$  轴重合, 地球坐标系在  $I$  系内绕  $E_2$

(即  $I_2$ ), 逆时针方向以角速度  $\omega$  自转。

2.1.3 航天器轨道坐标系  $B(B_1, B_2, B_3)$

原点在轨道上,  $B_1$  轴指向轨道前向,  $B_3$  轴指向天顶(过  $I$  系原点),  $B_1, B_3$  在轨道面内,  $B_2$  与轨道面垂直。  $B$  系在  $I$  系内, 沿轨道以角速度  $\Omega$  作轨道运动。

2.1.4 地理坐标系  $G(G_1, G_2, G_3)$

从  $B$  坐标系沿  $B_3$  轴( $G_3$  轴) 平移 “ $-(H-h)$ ” (航天器到星下点的真高度), 即得到  $G$  坐标系。  $G_1, G_2$  即景物偏离星下点前向和横向距离。

2.1.5 航天器坐标系  $S(S_1, S_2, S_3)$

该坐标系原点与  $B$  系原点重合, 航天器无姿态运动时  $S$  系和  $B$  系重合, 航天器的三轴姿态  $\varphi, \theta, \psi$  即指  $S$  系在  $B$  系内的三轴姿态。

2.1.6 传感器坐标系  $C(C_1, C_2, C_3)$

传感器物镜的主点为该坐标系的原点, 当传感器在航天器内无安装误差或很小时, 传感器坐标系与飞船航天器坐标系重合, 而比例尺缩小  $(f/H-h)$ 。

2.1.7 像面坐标系  $P(P_1, P_2, P_3)$

该坐标系原点在相面中心,  $C$  系沿  $C_3$  轴平移  $f$  (传感器物镜焦距) 即得到  $P$  系,  $P_1$  和  $P_2$  组成像面。

2.2 坐标变换

从地面景物在地理坐标系中的位置到像面坐标系中的像, 可以通过如图 2 所示的 14 次线性变换过程建立相应的关系。

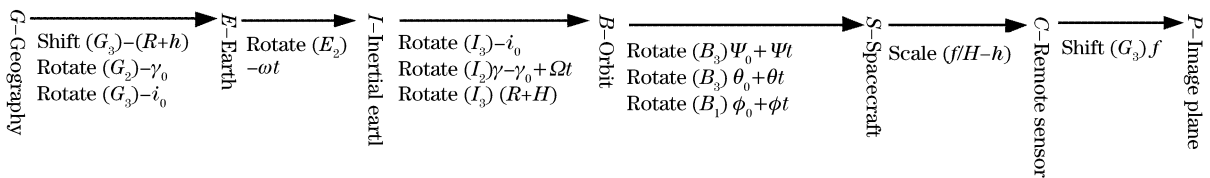


Fig. 2 Coordinate transformations detailed operations

2.3 像移方程

2.3.1 像面位置方程

从图 2 的变换过程可以得到从地理坐标系到像面坐标系的变换方程<sup>[10]</sup>:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{H-h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f}{H-h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f}{H-h} & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & \sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (R+h) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

### 2.3.2 像移速度方程及像移速度求解

将方程(1)两边对时间  $t$  微分后, 求出  $t=0$  的值, 即可得到相面上各点的像移方程:

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=0} = \begin{bmatrix} dP_1/dt \\ dP_2/dt \\ dP_3/dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{P_1} \\ V_{P_2} \\ V_{P_3} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} V_{P_1} = \left. \frac{dP_1}{dt} \right|_{t=0} &= \frac{f}{H-h} [\Omega(R+h) - \omega(R+h)\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\sin\gamma_0] \cos\theta_0 \cos\Psi_0 - \\ &\frac{f}{H-h} [\omega(R+h)\sin i_0\cos\gamma_0 - G_1\omega\sin i_0\sin\gamma_0] \cos\theta_0 \sin\Psi_0 + \\ &\frac{f}{H-h} [G_1\Omega - G_1\omega\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\cos\gamma_0] \sin\theta_0 + \frac{G_1f}{H-h} (\dot{\theta}\sin\theta_0\cos\Psi_0 + \dot{\Psi}\cos\theta_0\sin\Psi_0) + \\ &\frac{G_2f}{H-h} (\dot{\theta}\sin\theta_0\sin\Psi_0 - \dot{\Psi}\cos\theta_0\cos\Psi_0) - f\dot{\theta}\cos\theta_0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{P_2} = \left. \frac{dP_2}{dt} \right|_{t=0} &= \frac{f}{H-h} [\Omega(R+h) - \omega(R+h)\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\sin\gamma_0] \times \\ &(-\cos\varphi_0\sin\Psi_0 + \sin\varphi_0\sin\theta_0\cos\Psi_0) - \\ &\frac{f}{H-h} [\omega(R+h)\sin i_0\cos\gamma_0 - G_1\omega\sin i_0\sin\gamma_0] (\cos\varphi_0\cos\Psi_0 + \sin\varphi_0\sin\theta_0\sin\Psi_0) - \\ &\frac{f}{H-h} (G_1\Omega - G_1\omega\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\cos\gamma_0) \sin\varphi_0\cos\theta_0 - \\ &\frac{G_1f}{H-h} [\dot{\varphi}(\sin\varphi_0\sin\Psi_0 + \cos\varphi_0\sin\theta_0\cos\Psi_0) + \dot{\theta}\sin\varphi_0\cos\theta_0\cos\Psi_0 - \\ &\dot{\Psi}(\cos\varphi_0\cos\Psi_0 + \sin\varphi_0\sin\theta_0\sin\Psi_0)] + \\ &\frac{G_2f}{H-h} [\dot{\varphi}(\sin\varphi_0\cos\Psi_0 - \cos\varphi_0\sin\theta_0\sin\Psi_0) - \dot{\theta}\sin\varphi_0\cos\theta_0\sin\Psi_0 + \\ &\dot{\Psi}(\cos\varphi_0\sin\Psi_0 - \sin\varphi_0\sin\theta_0\cos\Psi_0)] + \\ &f(\dot{\varphi}\cos\varphi_0\cos\theta_0 - \dot{\theta}\sin\varphi_0\sin\theta_0), \end{aligned} \quad (3)$$

最终得到像移速度主向量值和偏流角如下:

$$V_P = \sqrt{V_{P_1}^2 + V_{P_2}^2}, \quad (4)$$

$$\beta_P = \arctan(V_{P_2}/V_{P_1}). \quad (5)$$

## 3 参量定义和误差分配

### 3.1 参量定义

$R$  为相对于地心的地球半径(km);  $H$  为被摄影

物处, 航天器的轨道高度(km);  $h$  为被摄影物的地物地形高度(km);  $i_0$  为轨道倾角(轨道平面和地球赤道平面间的夹角);  $\alpha, \lambda$  为在地心坐标系中, 航天器星下点经度和纬度;  $\omega$  为地球自转角速率  $7.2921 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;  $\Omega$  为在摄影时刻, 航天器轨道运动相对地心的角速率( $\text{s}^{-1}$ );  $\Psi_0, \theta_0, \varphi_0$  分别为航天器坐标系相对于轨道坐标系在摄影时刻的偏航、俯仰和横滚姿态角;  $\dot{\Psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$  分别为航天器坐标系相对于轨道坐

标系的偏航、俯仰和横滚角速率;  $\Psi_{\max}$ 、 $\theta_{\max}$ 、 $\varphi_{\max}$  为航天器三轴姿态角的最大值;  $\dot{\Psi}_{\max}$ 、 $\dot{\theta}_{\max}$ 、 $\dot{\varphi}_{\max}$  为航天器

三轴姿态角速率的最大值;  $f$  为传感器镜头焦距 (mm)。其中  $G_1, G_2$  为

$$\begin{cases} G_1 = (H-h) \left( \frac{-\sin \varphi_0 \cos \theta_0}{\cos \varphi_0 \cos \psi_0} - \frac{\sin \theta_0}{\cos \theta_0 \sin \psi_0} \right) / \left( \frac{\cos \psi_0}{\sin \psi_0} + \frac{\sin \psi_0}{\cos \psi_0} \right), \\ G_2 = (H-h) \left( \frac{\sin \varphi_0 \cos \theta_0}{\cos \varphi_0 \sin \psi_0} - \frac{\sin \theta_0}{\cos \theta_0 \cos \psi_0} \right) / \left( \frac{\sin \psi_0}{\cos \psi_0} + \frac{\cos \psi_0}{\sin \psi_0} \right), \end{cases} \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \arcsin(\sin \lambda / \sin i_0), \quad (7)$$

式中  $V_{P_1}, V_{P_2}$  分别为传感器像面上前向和横向像移速度 (mm/s);  $V_P$  为传感器像面上像移速度主向量值 (mm/s);  $\beta_P$  为传感器像面上像移速度主向量在相面坐标系内与  $P_1$  轴的夹角——偏流角。

### 3.2 误差分配

根据 96 级 TDI CCD 推扫的要求或 0.01 s 曝光时间的要求, 对 11 个变量进行如下的误差分配:

$\sigma_{VS} = 0.01$  km/s 是给出的航天器速度允许误差;

$\sigma_{H-h} = 0.1$  km 是航天器真高度的允许误差;

$\sigma_{R+h} = 0.05$  km 是地物地心距的允许误差;

$\sigma_\alpha = \sigma_\lambda = 3$  km 分别为星下点纬度和经度给出值的允许误差;

$\sigma_\psi = \sigma_\theta = \sigma_\varphi = 0.05^\circ$  分别为航天器偏航、俯仰和横滚姿态角允许的测量误差;

$\sigma_{\dot{\psi}} = \sigma_{\dot{\theta}} = \sigma_{\dot{\varphi}} = 0.002^\circ/s$  分别为航天器偏航、俯仰和横滚姿态角速率允许的测量误差;

$\sigma_f = 1.35$  mm 为传感器镜头焦距值的允许测量误差。

## 4 对像移速度矢计算值的误差综合

按理  $V_{P_1}, V_{P_2}, V_P$  和  $\beta_P$  解析式已经建立,  $\sigma_{VS}, \sigma_{H-h}, \sigma_{R+h}, \sigma_\lambda, \sigma_\psi, \sigma_\theta, \sigma_\varphi, \sigma_{\dot{\psi}}, \sigma_{\dot{\theta}}, \sigma_{\dot{\varphi}}$  和  $\sigma_f$  11 个随机变量 (误差项) 的概率密度分布形式和均方偏差已经给出, 完全可以应用全微分法来求出合成后的  $V_{P_1}, V_{P_2}, V_P$  和  $\beta_P$  的均方偏差, 来估计像移速度的误差。

但不难想象, 如此复杂的解析式用全微分法将会遇到不可克服的困难, 因此逼迫我们寻求一种新的计算方法——蒙特卡罗法 (统计试验法) 来进行误差的合成。

合成步骤如下:

I) 如表 1, 对应公式中的 11 个随机变量和六个姿态初始值产生 17 个伪随机数序列  $S_{i,j}, i=1, 2, \dots, n$  ( $n$  为计算采样数, 一个比较大的数);  $j=1, 2, \dots, m$  ( $m=17$ , 即 17 个伪随机数)。公式中,  $i_0, \omega$  为常数, 而  $\gamma_0$  的误差已经在  $\sigma_\lambda$  的误差项中考虑, 故

不重复计算。

Table 1 Random error computation table

Index $i, j$	Uniform distribution random matrix $S_{i,j}$	Normal distribution random matrix $T_{i,j}$	Random error
1	$S_{i,1}$		$\varphi_0 = 2(S_{i,1} - 0.5)\varphi_{\max}$
2	$S_{i,2}$		$\theta_0 = 2(S_{i,2} - 0.5)\theta_{\max}$
3	$S_{i,3}$		$\psi_0 = 2(S_{i,3} - 0.5)\psi_{\max}$
4	$S_{i,4}$		$\dot{\varphi}_0 = 2(S_{i,4} - 0.5)\dot{\varphi}_{\max}$
5	$S_{i,5}$		$\dot{\theta}_0 = 2(S_{i,5} - 0.5)\dot{\theta}_{\max}$
6	$S_{i,6}$		$\dot{\psi}_0 = 2(S_{i,6} - 0.5)\dot{\psi}_{\max}$
7		$T_{i,7}$	$\Delta V_S = \text{sign}(\cdot) T_{i,7} \sigma_{VS}$
8		$T_{i,8}$	$\Delta(H-h) = T_{i,8} \sigma_{H-h}$
9		$T_{i,9}$	$\Delta(R+h) = T_{i,9} \sigma_{R+h}$
10		$T_{i,10}$	$\Delta\alpha = T_{i,10} \sigma_\alpha$
11		$T_{i,11}$	$\Delta f = T_{i,11} \sigma_f$
12		$T_{i,12}$	$\Delta\varphi = T_{i,12} \sigma_\varphi$
13		$T_{i,13}$	$\Delta\theta = T_{i,13} \sigma_\theta$
14		$T_{i,14}$	$\Delta\psi = T_{i,14} \sigma_\psi$
15		$T_{i,15}$	$\Delta\dot{\varphi} = T_{i,15} \sigma_{\dot{\varphi}}$
16		$T_{i,16}$	$\Delta\dot{\theta} = T_{i,16} \sigma_{\dot{\theta}}$
17		$T_{i,17}$	$\Delta\dot{\psi} = T_{i,17} \sigma_{\dot{\psi}}$

17 个随机变量中,  $\varphi_0, \theta_0, \psi_0, \dot{\varphi}_0, \dot{\theta}_0$  和  $\dot{\psi}_0$  六个变量为均匀分布, 因此产生均匀分布随机数矩阵  $S_{i,j}$ , 其中:  $i=1, 2, \dots, n$  ( $n$  是一个比较大的数, 即计算采样数);  $j=1, 2, \dots, 6$ 。而其余的 11 个随机变量为正态分布, 因此产生归一化正态分布随机数  $T_{i,j}$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n; j=7, 8, \dots, 17$ 。

II) 将表 1 中  $i=1$  的  $\varphi_{0(i=1)}, \theta_{0(i=1)}, \psi_{0(i=1)}, \dot{\varphi}_{0(i=1)}, \dot{\theta}_{0(i=1)}, \dot{\psi}_{0(i=1)}$  的值, 以及 (2) 式和 (3) 式中其余参量某一时刻  $t_{(i=1)}$  的值  $V_{S(i=1)}, (H-h)_{(i=1)}, (R+h)_{(i=1)}, f_{(i=1)}$ , 以及  $i_0, \gamma_0$  和  $\omega$  共 13 个参量值代入 (2) 式~(6) 式, 可以获得  $i=1$ , 即第一个采样点的  $V_{P(i=1)}$  和  $\beta_{P(i=1)}$ 。

III) 将表 1 中  $i=1$  的  $[\varphi_{0(i=1)} + \Delta\varphi_{(i=1)}], [\theta_{0(i=1)} +$

$\Delta\theta_{(i=1)}$ 、 $[\psi_{0(i=1)} + \Delta\psi_{(i=1)}]$ 、 $[\dot{\varphi}_{0(i=1)} + \Delta\dot{\varphi}_{(i=1)}]$ 、 $[\dot{\theta}_{0(i=1)} + \Delta\dot{\theta}_{(i=1)}]$ 和 $[\dot{\psi}_{0(i=1)} + \Delta\dot{\psi}_{(i=1)}]$ 的值,  $[V_{S(i=1)} + \Delta V_{S(i=1)}]$ 、 $[(H-h)_{(i=1)} + \Delta(H-h)_{(i=1)}]$ 、 $[(R+h)_{(i=1)} + \Delta(R+h)_{(i=1)}]$ 、 $[f_{(i=1)} + \Delta f_{(i=1)}]$ 和 $[\gamma_{0(i=1)} + \Delta\gamma_{0(i=1)}]$ 的值, 以及  $i_0$ 、 $\omega$  共 13 个参量值代入(2)式~(7)式, 可以获得  $t_{(i=1)}$  时刻的  $(V_P + \Delta V_P)_{(i=1)}$  和  $(\beta_P + \Delta\beta_P)_{(i=1)}$  的值。由此可得

$$\Delta V_{P(i=1)} = (V_P + \Delta V_P)_{(i=1)} - V_{P(i=1)}, \quad (8)$$

$$\Delta\beta_{P(i=1)} = (\beta_P + \Delta\beta_P)_{(i=1)} - \beta_{P(i=1)}. \quad (9)$$

IV) 根据摄影周期, 将  $\gamma_{0(i=1)}$  增加一个增量, 即增加航天器轨道运动增加的中心角得到  $\gamma_{0(i=2)}$ , 同时将表 1 中  $i = 2, j = 1, 2, \dots, 17$  的 17 个随机数按步骤 II)、III) 计算, 获得  $\Delta V_{P(i=2)}$  和  $\Delta\beta_{P(i=2)}$ 。

V) 重复以上步骤, 最终可以获得两组  $\Delta V_P$  和  $\Delta\beta_P$  合成误差的数列, 即两组合成误差的样本:

$$\Delta V_{P(i=1)}, \Delta V_{P(i=2)}, \dots, \Delta V_{P(i=n)};$$

$$\Delta\beta_{P(i=1)}, \Delta\beta_{P(i=2)}, \dots, \Delta\beta_{P(i=n)}.$$

通过对这两组样本进行统计分析, 可以获得合成误差的统计特性。

表 2 为各参量随机波动产生的误差  $\Delta V_P$  区间概率分布情况, 即  $\Delta V_P$  的统计表。表 3 为在不同的摄影曝光时间  $t$  下,  $\Delta V_P \cdot t$  不大于总体分配的允许值 0.0012 mm 之内的概率数。表 4 为  $\Delta\beta_P$  的统计表。

Table 2  $\Delta V_P$  probability distribution

$\Delta V_P$ range / (mm/s)	Probability	$\Delta V_P$ range / (mm/s)	Probability
-0.5~-0.4	0.90	0~0.1	25.11
-0.4~-0.3	0.89	0.1~0.2	16.5
-0.3~-0.2	5.94	0.2~0.3	5.4
-0.2~-0.1	16.67	0.3~0.4	0.78
-0.1~0	28.5	0.4~0.5	0.16

Table 3  $\Delta V_P$  probability distribution at various exposure time

Expose time /s	Probability	Expose time /s	Probability
1/100	81.83	1/300	99.83
1/150	91.11	1/350	99.89
1/200	96.90	1/400	99.89
1/250	99.10		

Table 4  $\Delta\beta_P$  probability distribution

$\Delta\beta_P$ range	Probability	$\Delta\beta_P$ range	Probability
-0.04~-0.03	0.22	0~0.01	33.17
-0.03~-0.02	2.22	0.01~0.02	16.5
-0.02~-0.01	13	0.02~0.03	2.33
-0.01~0	32.33	0.03~0.04	0.22

结论 i) 由于采用了全参量像移速度矢实时计算、应用蒙特卡罗法对影响像移速矢的全部参量的波动进行误差合成, 可以对这些参量进行更合理的分配, 尤其是应用了航天器姿态角速率的实时测量值, 可以适当的降低航天器的姿态控制精度, 而达到高精度的像移补偿。ii) 以上仅对航天遥感器星下点摄影时的像移速度矢进行了求解, 如果要求航天遥感器在侧摆或前摆, 以及侧摆和前后摆组合后的条件下摄影时, 虽然其像面位置方程、像移速度方程和像移速度矢的求解将更为复杂, 但用同样的方法和过程可以求出唯一解, 这里不再推导。

### 参 考 文 献

- 1 Yan Changxiang, Wang Jiaqi. Coordinate transformation method in image motion calculation of aerospace remote sensor. *Optics & Precision Engineering* (光学精密工程), 2000, **18**(3): 203~207 (in Chinese)
- 2 Sun Quanxing. Requests of postural stability for High resolution transmission type reconnaissance satellites. *Control Engineering* (控制工程), 1992, **19**(5): 1~11 (in Chinese)
- 3 Trott T. The effects of motion in resolution. *Photogramm. Engng.*, 1960, **26**(2): 819~827
- 4 Rudoler S, Hadar O, Fisher M *et al.*. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations, Part 2: Experiment. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(5): 577~589
- 5 Ghosh S K. Image motion compensation through augmented collinearity. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6): 1014~1017
- 6 Demin A V, Dzhamanbaev A A. Image stabilization in telescopic devices. *J. Opt. Technol.*, 1995, **62**(8): 540~542
- 7 Toropin V A. Method of calculating the random image-motion velocities in oblique frame photography. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1982, **49**(1): 1~4
- 8 Eskov D N, Druz I I. Methods of compensating the image motion velocity for oblique panoramic photography. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1977, **44**(12): 745~747
- 9 Nilov E V. Use of an electro-optical deflector for compensating image motion in high-speed movie cameras. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1984, **51**(4): 221~223
- 10 Zhang Yimo. *Applied Optics* (应用光学). Beijing: Mechanism Industry Press. 1982 (in Chinese)