

## 影响空间相机偏流角估值误差的参数

李伟雄<sup>1,2</sup>, 徐抒岩<sup>1</sup>, 闫得杰<sup>1</sup>

- (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 100049)

**摘要:** 为了减小 TDI CCD 空间相机偏流角估值误差, 利用齐次坐标转换法推导了偏流角计算的数学模型, 运用蒙特卡罗法获取偏流角计算值的误差样本, 并统计出偏流角估值误差。对 4 个误差参数取不同值时的偏流角估值误差进行了比较, 分析其对偏流角估值误差的影响。统计及分析结果表明: 姿态角速率测量精度从  $0.005 (^{\circ})/s$  提高至  $0.001 (^{\circ})/s$  后, 偏流角估值误差减小 61%; 姿态角测量精度从  $0.15^{\circ}$  提高至  $0.03^{\circ}$  后, 偏流角估值误差减小 9%。地心距允许误差和轨道中心角允许误差的变化对偏流角估值误差无直接影响; 将姿态角速率测量精度从  $0.005 (^{\circ})/s$  至  $0.002 (^{\circ})/s$ 、姿态角测量精度从  $0.15^{\circ}$  至  $0.06^{\circ}$  与只将姿态角速率测量精度从  $0.005 (^{\circ})/s$  提高至  $0.001 (^{\circ})/s$  相比较, 偏流角估值误差的减小值仅相差  $0.166 912'$ , 同时提高这两个精度是减小偏流角估值误差的最佳策略。分析过程与结果对空间相机设计有一定的参考价值。

**关键词:** TDI CCD 空间相机; 像移补偿; 偏流角估值误差; 蒙特卡罗法

中图分类号: V475.3; V448.22 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)08-1530-07

## Influencing parameters of estimate errors of space camera's drift angle

Li Weixiong<sup>1,2</sup>, Xu Shuyan<sup>1</sup>, Yan Dejie<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to decrease the estimate errors of the space camera's drift angle of a TDI CCD space camera, a mathematical model of drift angle was established based on the coordinate conversion equation deduced by the homogeneous coordinate conversion theory. The error samples of drift angle calculation by using Monte-Carlo method and the estimate errors of drift angle by statistical approach were obtained. The estimate errors of drift angle were compared when the four error parameters were calculated with different values, the effects of them on estimate errors of drift angle were analyzed. Statistics and analysis results indicate that the angle can be decreased by 9% through changing metrical precision of attitude angle from  $0.15^{\circ}$  to  $0.03^{\circ}$ , and decreased by 61% through changing metrical precision of attitude angle velocity from  $0.005 (^{\circ})/s$  to  $0.001 (^{\circ})/s$ . The changes of acceptable errors of distances from aircraft to earth center and orbit center angle have no effects on estimate errors of drift angle. Changing metrical precision of

收稿日期: 2010-12-22; 修订日期: 2011-01-19

基金项目: 国防科研项目

作者简介: 李伟雄(1985-), 男, 博士生, 主要从事航天遥感器像移计算矢模型的研究和实现。Email: wishing2190@yahoo.com.cn

导师简介: 徐抒岩(1963-), 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间光学遥感器计算机控制、图像处理。Email: xusy@ciomp.ac.cn

attitude angle velocity from 0.005 (°)/s to 0.002 (°)/s and changing metrical precision of attitude angle from 0.15° to 0.06° to decrease the estimate errors, difference is merely 0.166912', which is less than changing metrical precision of attitude angle velocity from 0.005 (°)/s to 0.001 (°)/s only. The best method to decrease the estimate errors of drift angle is to improve the two precisions at the same time. The analysis process and result have certain reference value for designing space camera.

**Key words:** TDI CCD space camera; image compensation; estimate errors of drift angle; Monte-Carlo method

### 0 引言

随着遥感技术的发展,空间光学成像的分辨率越来越高,TDI CCD 相机在高分辨率成像中的应用越来越广。TDI CCD 正常工作的基本前提是光生电荷包的转移与焦面上图像的运动保持同步,任何的误匹配都将导致图像模糊<sup>[1-2]</sup>。多级 TDI CCD 对地面同一目标曝光相当于积分时间延长,要想获得清晰的图像,必须在此较长积分时间内保持同步。然而飞行器在轨摄像期间,由于地球本身的自转及飞行器自身姿态等参数的影响,其运动方向与相机实际成像方向不一致,拍摄时两者之间的夹角即为偏流角<sup>[3]</sup>,偏流角会导致相机在积分成像过程中产生图像的横向像移,破坏其与光生电荷包运动的同步性,影响相机的成像质量。因此,对偏流角进行调整是 TDI CCD 空间相机像移补偿系统中的一项重要任务<sup>[4-8]</sup>。

但无论像移计算矢模型有多么精确,对于给定的任何范围内的参数能多么准确地计算出应该调整的偏流角,都会因为参与偏流角计算的各参数在测量上存在的误差而使得 TDI CCD 相机计算出的偏流角存在误差。对于参与偏流角计算参数的测量误差都能够精确地测量并且通过测量的样本进行统计,获取参数测量和控制误差的概率分布。由于地面条件的限制,难以模拟出当以上参数存在控制和测量误差时相机的工作实况,很难通过测量的方法获取像移计算矢的残差样本,无法统计出像移计算矢的误差分布。但是可以根据误差的传递法则,通过对仿真样本的统计来模拟像移计算矢的误差分布,这种通过对仿真样本的统计得到的像移计算矢的误差称为估值误差。

文中主要对参与偏流角计算的参数在引入不同随机误差时的偏流角计算值的仿真样本进行统计,根据统计数据分析,参数引入的随机误差(测量误差)对

偏流角计算值的影响,出减小偏流角估值误差的最好方法,为 TDI CCD 空间相机的研制工作提供参考。

### 1 偏流角估值误差模型

#### 1.1 偏流角计算的数学模型

通过齐次坐标变换,将拍摄景物点从景点星平面坐标系变换到像面坐标系是求取偏流角计算值常用的方法,坐标变换过程如图 1 所示。

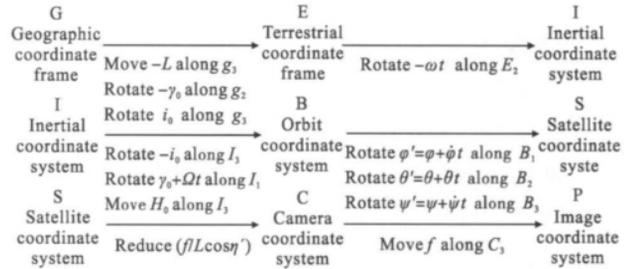


图 1 坐标变换过程图

Fig.1 Process of coordinate transformation

图中,  $H_0$  为被拍摄景物处的地物地形高度;  $L$  为飞行器到拍摄景点的距离;  $i_0$  为轨道倾角;  $f$  为相机镜头焦距;  $\eta'$  为被拍摄景物通过光学系统成像时离轴角与视场角的合成角;  $\Omega$  为飞船轨道运动相对地心的角速率;  $\gamma_0$  为摄影时刻在轨道平面飞船到降交点或升交点之间所对应的中心角;  $\psi_0$ 、 $\theta_0$ 、 $\varphi_0$  分别为飞船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;  $\dot{\psi}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$  分别为飞船坐标系相对于轨道坐标系在摄影时刻的偏航、俯仰和横滚姿态角速度。在景点平面上的任一点的坐标为  $[g_1, g_2, 0, 1]$ , 通过图 1 中的齐次坐标变换转化为像面上的一点坐标为  $[p_1, p_2, p_3, 1]$ 。景点坐标系中的任何点都能在像平面上找到对应的点。

$$p_1 = F_1(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, t) \cdot f \cdot \cos \eta' / L \quad (1)$$

$$p_2 = F_2(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, t) \cdot f \cdot \cos \eta' / L \quad (2)$$

式中:  $F_1, F_2$  是包含  $\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, t$  的函数。对  $p_1, p_2$  时间  $t$  微分后, 求出  $t=0$  的值, 即可得到相机像面的前向像移速度  $V_{p_1}, V_{p_2}$  和相机像面的横向像移速度。

$$V_{p_1} = \frac{dp_1}{dt} \Big|_{t=0} = F'_1(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, t) \cdot f \cdot \cos\eta' / L \quad (3)$$

$$V_{p_2} = \frac{dp_2}{dt} \Big|_{t=0} = F'_2(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, t) \cdot f \cdot \cos\eta' / L \quad (4)$$

最终得到偏流角  $\beta$ :

$$\beta = \arctan(V_{p_2} / V_{p_1}) = \arctan \left[ \frac{F'_1(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, 0)}{F'_2(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, 0)} \right] = F(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}) \quad (5)$$

式中:  $F$  是包含  $\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}$  的函数。

## 1.2 偏流角计算的误差样本的数学模型

根据 1.1 节中推导出的偏流角计算方程可以进一步推导传递关系偏流角估值误差, 计算方法有全差分法、绝对值法、均方误差法和蒙特卡罗法等。其中, 蒙特卡罗法的数学模型为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta Y = F(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_i + \Delta x_i) - F(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (6)$$

式中:  $\Delta Y$  为选取的某一组参数通过误差传递的误差;  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  为计算过程中各参数的测量值;  $\Delta x_i$  为其测量误差;  $F$  为误差传递函数。将公式(5)代入公式(6)中, 得到选取的某一组参数的偏流角计算的误差  $\Delta Y_i$ :

$$\Delta Y_i = F(\gamma_0 + \Delta\gamma_0, i_0 + \Delta i_0, \omega + \Delta\omega, \Omega + \Delta\Omega, H_0 + \Delta H_0, \phi + \Delta\phi, \dot{\phi} + \Delta\dot{\phi}, \theta + \Delta\theta, \dot{\theta} + \Delta\dot{\theta}, \varphi + \Delta\varphi, \dot{\varphi} + \Delta\dot{\varphi}) - F(\gamma_0, i_0, \omega, \Omega, H_0, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}) \quad (7)$$

式中: 参数前带  $\Delta$  表示该参数的测量误差。

对选取样本的偏流角计算的误差进行统计, 可以得到偏流角估值误差。

## 2 偏流角误差分析

误差根据其性质可分为系统误差和随机误差。偏流角的随机误差是由影响偏流角的所有参数的随机误差产生。影响偏流角的随机误差参数和系统

差, 归纳起来主要有以下几项。

### (1) 偏流角计算原理误差

偏流角计算模型中通常分为运动偏流角和畸变偏流角, 前者是由景物与相机像面相对运动产生的, 具有规律性, 可以通过实时调节来补偿; 后者与地球曲率有关, 由于同一像面对应的畸变有很大不同, 通过飞行器姿态或简单的偏流机构不能完全补偿, 通常称不可补偿的那一部分畸变偏流角为畸变偏流角, 作为不可修正系统误差。

### (2) 相机连续拍摄时产生的误差

相机在连续拍摄时, 在摄像过程中由于飞行器偏航角速率积累引起的偏流角误差, 与拍摄时间正相关。因此, 在长时间拍摄时应采用实时调偏流来实时补偿拍摄过程中产生的偏流角, 但实时调偏流时机构的运动也可能对相机拍摄有影响, 还需继续研究解决办法。

### (3) 飞行器偏航角测量误差

这个误差是由飞行器姿态角测量精度产生的, 是不可修正的。

### (4) GNC 与飞行器之间的安装误差

GNC 与飞行器之间有安装误差, 通常不大于  $3'$ , 该误差可以通过实际测量得到, 并通过软件进行修正, 但测量也具有不确定度, 通常为  $30''$ 。

另外, 温度变化、发射时的振动、重力变形等因素的影响会导致 GNC 与飞行器之间产生偏差, 该误差是随机误差, 通常不大于  $3'$ 。

### (5) 相机与飞行器之间的安装误差

相机与飞行器之间有安装误差, 可以通过实际测量得到, 并通过软件进行修正, 测量也具有不确定度, 通常为  $30''$ 。

另外, 温度变化、发射时的振动、重力变形等因素的影响会导致相机与飞行器之间产生偏差, 该误差是随机误差, 通常不大于  $3'$ 。

### (6) 相机坐标系与像面坐标系之间的安装误差

相机坐标系与像面坐标系之间会存在安装误差, 通常不大于  $3'$ , 该误差可以通过实际测量得到, 并通过软件进行修正, 测量具有不确定度, 通常为  $20''$ 。

(7) 温度变化、发射时的振动、重力变形等因素的影响会导致相机坐标系与像面坐标系之间产生偏差, 该误差是随机误差, 通常不大于  $3'$ 。

(8) 偏流角估值误差

由影响像移速度矢的各参数的不确定度引起的像移速度方向计算值与实际像移速度方向值之间的误差。前文对偏流角的计算模型进行了说明,可以看出,引起偏流角估值误差的随机误差参数如下:

- 1) 姿态角测量精度; 2) 姿态角速率测量精度;
- 3) 地球自转角速率测量精度; 4) 轨道倾角测量精度;
- 5) 轨道角速率允许误差; 6) 地心距允许误差; 7) 轨道中心角允许误差。

虽然这些参数根据误差产生的不同而服从不同的分布,但在通常情况下,影响测量值的参数较多,而这 7 个参数都是通过测量获取的,所以可以认为它们都服从高斯分布。文中主要研究影响偏流角估值误差受以上误差参数的影响情况。

3 影响偏流角估值误差的参数

在 1.2 节中给出了选取的某一组参数的偏流角计算的误差  $\Delta Y_i$ , 由公式(7)可以看出,  $\Delta Y_i$  是  $\gamma_0, \Delta\gamma_0, i_0, \Delta i_0, \omega, \Delta\omega, \Omega, \Delta\Omega, H_0, \Delta H_0, \phi, \Delta\phi, \dot{\phi}, \Delta\dot{\phi}, \theta, \Delta\theta, \dot{\theta}, \Delta\dot{\theta}, \Delta\varphi, \dot{\varphi}, \Delta\dot{\varphi}$  的函数。 $i_0, \omega$  对于飞行器在稳定飞行阶段是恒值,在进行偏流角计算时,通常不以实时测量的方式来更新此参数,因此  $\Delta i_0, \Delta\omega$  可以认为是 0。 $\Omega$  为  $H_0$  地心距函数,在进行偏流角计算时,通常不直接使用,而是先通过  $H_0$  计算出结果后再带入公式(5)中,所以  $\Delta\Omega$  也是 0。除去以上 3 个误差参数,文中重点分析姿态角测量误差、姿态角速率测量误差、地心距测量误差、以及轨道中心角测量误差对偏流角估值误的影响。

以某一飞行器为例,选取其典型的工作参数来进行偏流角估值误差分析:  $i_0=42.5^\circ; \omega=7.2924e-5 \text{ rad/s}; H_0=6778 \text{ km}; \phi=0.5^\circ; \dot{\phi}=0.025 \text{ (}^\circ\text{)/s}; \theta=0.5^\circ; \dot{\theta}=0.025 \text{ (}^\circ\text{)/s}; \varphi=15^\circ; \dot{\varphi}=0.025 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ ; 轨道中心角  $\gamma_0$  为  $-180^\circ \sim 180^\circ$ , 模拟飞行器沿轨道飞行一周,每 0.05° 取一个点。再根据飞行器的典型误差参数来构造测量误差样本:姿态角测量精度  $0.15^\circ$ ; 姿态角速率测量精度  $0.005^\circ/\text{s}$ ; 飞行器飞行速度允许误差通过地心距允许误差引入;地心距允许误差 1000m; 轨道中心角允许误差  $0.15^\circ$ 。因为上述 4 参数服从高斯分布,可在 Matlab 平台上使用正态分布随机数发生函数  $\text{random}(1/3)$  产生  $-1 \sim 1$  的随机数,再乘以与之对应的测量精度或允许

误差作为一次测量时的测量误差,即  $\Delta\phi=\Delta\theta=\Delta\varphi=0.15 \times \text{random}(1/3); \Delta\dot{\phi}=\Delta\dot{\theta}=\Delta\dot{\varphi}=0.05 \times \text{random}(1/3); \Delta\gamma_0=0.15 \times \text{random}(1/3); \Delta H_0=1000 \times \text{random}(1/3)$ 。

将以上参数带入公式(7)中,得到一组偏流角计算误差样本  $\Delta Y_i (i=1, 2 \dots 7201)$ 。对此样本进行统计,取  $3\sigma$  的误差作为此误差参数下的偏流角估计误差为 19.977 56。

为了确定误差参数对偏流角估值误差的影响大小,将 4 个误差参数的值分别降低至原值的  $4/5, 3/5, 2/5, 1/5$ , 其他参数保持不变。用上述方法获取偏流角计算误差样本,求出不同误差参数时的偏流角估值误差;再对不同误差参数时求出的偏流角估值误差数据进行统计,分析此误差参数的变化是否影响偏流角估值误差。对于一些误差参数,在其值降低 5 倍时,偏流角估值误差变化不明显的,就反过来增大此误差参数值,以观察其是否对偏流角估值误差有影响。以下分别为 4 个误差参数的统计和分析过程及结果。

3.1 姿态角测量精度对偏流角估值误差的影响

姿态角测量精度即飞行器的三轴姿态角(俯仰角、滚动角、偏航角)测量误差统计值。姿态角测量精度取不同值时的偏流角估值误差见表 1。

表 1 姿态角测量精度取不同值时的偏流角估值误差

Tab.1 Estimate errors of drift angle in different metrical precisions of attitude angle

Metical precisions of attitude angle/(°)	Estimate errors of drift angle/(°)
0.15	19.977 56
0.12	19.406 46
0.09	18.655 18
0.06	18.517 3
0.03	18.382 5

当姿态角测量精度提高时,偏流角估值误差减小明显;随着姿态角测量精度的提高,偏流角估值误差增大的速率变慢,说明提高姿态角测量精度,可在姿态角测量误差较大时减小偏流角估误差,而当姿态角测量误差较小时,再通过提高姿态角测量精度来获得较小的偏流角估误差是不可行的;一方面是提高姿态角测量精度存在较大难度,另一方面是偏流角估误差减小的越来越缓慢,且当姿态角测量精度由  $0.15^\circ$  提高至  $0.03^\circ$  时,偏流角估值误差仅减小 9.1%。

### 3.2 姿态角速率测量精度对偏流角估值误差的影响

姿态角速率测量精度即飞行器的三轴姿态角速率测量误差统计值,对姿态稳定度的测量误差。姿态角速率测量精度取不同值时的偏流角估值误差见表 2。

表 2 姿态角速率测量精度取不同值时的偏流角估值误差

Tab.2 Estimate errors of drift angle in different metrical precisions of attitude angle velocity

Metical precisions of attitude angle attitude/(°)·s <sup>-1</sup>	Estimate errors of drift angle/(′)
0.005	19.977 56
0.004	16.969 71
0.003	13.751 56
0.002	10.607 54
0.001	7.754 662

当姿态角速率测量精度提高时,偏流角估值误差大幅度减小,与姿态角速率测量精度提高成线性正比。姿态角速率测量精度是影响偏流角估值误差最为重要的参数,对偏流角估值误差的减小起着至关重要的作用。

### 3.3 地心距允许误差对偏流角估值误差的影响

对于近圆轨道,地心距与飞行器飞行速度相关,通常不给出后者,而是通过公式(8)来计算。

$$V \approx \sqrt{GM/H_0} \quad (8)$$

式中: $G$ 为万有引力常量 $6.67 \times 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}^2$ ;  $M$ 为地球质量 $5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$ ;  $H_0$ 为地心距;  $V$ 为飞行器飞行速度。

飞行器飞行速度的随机误差与地心距随机误差相关,地心距允许误差的不同直接影响到飞行器飞行速度随机误差的变化,两者同时影响偏流角估值误差。地心距允许误差取不同值时的偏流角估值误差见表 3。

地心距误差的加入同时引入了与其相关的飞行速度误差,随着地心距误差的增大,飞行器飞行速度误差也会相应增大,但对于地心距任一时刻的随机误差 $\Delta H_0$ ,必将引入与其符号相反的飞行器飞行速度误差 $\Delta V$ :

$$\Delta V = \sqrt{GM/(H_0 + \Delta H_0)} - \sqrt{GM/H_0} \quad (9)$$

随着地心距误差的减小,偏流角估值误差上下浮动,偏流角估值误差值变化很小。当地心距允许

误差为 5000m 时,偏流角估值误差为 19.6794′;当地心距允许误差为 200m 时,偏流角误差为 20.313 69′,相差很小。原因有两点:一方面是 $\Delta H_0$ 与 $\Delta V$ 负相关;另一方面是地心距所引起的横向像移和前向像移误差通过公式(5)计算求解偏流角后被消除。因此,地心距允许误差对偏流角估值误差的影响可以忽略,通过提高该参数的精度来减小偏流角估值误差无意义。

表 3 地心距允许误差取不同值时的偏流角估值误差

Tab.3 Estimate errors of drift angle in different acceptable errors of distances from aircraft to earth center

Acceptable errors of distances from aircraft to earth center/m	Estimate errors of drift angle/(′)
1 000	19.977 56
800	19.440 81
600	19.904 75
400	19.628 62
200	20.313 69
2 000	19.688 39
5 000	19.679 4

### 3.4 轨道中心角误差对偏流角估值误差的影响

轨道中心角是指从飞行器轨道在地球上的投影圆与赤道圆的交点到星下点的弧长对应的角度,它是星下点纬度的函数,其允许误差与星下点纬度误差是相关的,为了与模型对应,文中直接引入轨道中心角误差,也可以将轨道中心角用星下点纬度的函数来表示,通过引入星下点纬度误差的方式来进行统计分析。轨道中心角允许误差取不同值时的偏流角估值误差见表 4。

表 4 轨道中心角允许误差取不同值时的偏流角估值误差

Tab.4 Estimate errors of drift angle in different acceptable errors of orbit center angle

Acceptable errors of orbit center angle latitude/(°)	Estimate errors of drift angle/(′)
0.15	19.977 56
0.12	19.853 2
0.09	19.399 45
0.06	19.742 16
0.03	19.378 55
0.03	19.610 58
1.5	23.677 5

随着轨道中心角允许误差的减小, 偏流角估值误差有减小的趋势, 但轨道中心角在  $0.03^{\circ}\sim 0.15^{\circ}$  区间内, 偏流角估值误差变化很小。对于飞船, 轨道中心角允许误差通常不会超过  $0.15^{\circ}$ , 采用 GPS 来计算星下点纬度, 精度会更高。对于卫星, 轨道中心角允许误差通常能达到  $0.015^{\circ}$ 。鉴于此范围限定, 可以认为偏流角估值误差随轨道中心角允许变化很小, 因此, 通常不采取减小轨道中心角允许误差的方法来减小偏流角估值误差。

3.5 4 个参数对偏流角估值误差影响的对比

根据表 1~表 4 中的数据, 对 4 个影响偏流角估值误差的误差参数值在 1~1/5 倍变化的采样点通过 3 次样条函数进行拟合后得到比较图, 见图 2 所示。图中拟合的 4 条曲线分别为: 姿态角测量精度变化时的偏流角估值误差拟合曲线(曲线 1)、姿态角速率测量精度变化时的偏流角估值误差拟合曲线(曲线 2)、地心距允许误差变化时的偏流角估值误差拟合曲线(曲线 3)、轨道中心角允许误差变化时的偏流角估值误差拟合曲线(曲线 4)。

可以看出, 影响偏流角估值误差的 4 个参数中, 姿态角速率测量精度是影响偏流角估值误差最重要的参数, 它与偏流角的估值误差成近似线性关系, 在向飞行器提出精度要求时, 姿态角速率测量精度应该严格要求; 姿态角测量精度的提高对偏流角估值误差的减小在一定范围内有很好的效果, 在姿态角速率测量精度较高、提高难度较大时, 可以通过改变此误差参数来优化偏流角计算值。其他两个误差参数的变化对偏流角估值误差的影响较小, 在减小其参数值至原值 1/5 的情况下, 再进一步减小这

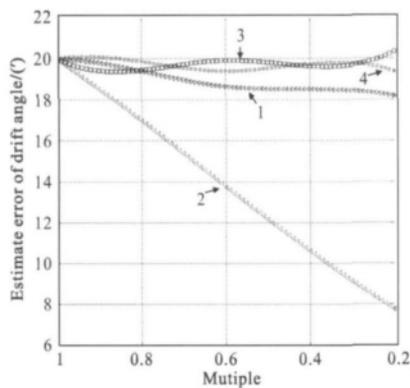


图 2 4 个误差参数的比较图

Fig.2 Comparison of four error parameters

些误差参数, 对于现行飞行器来说是很难实现的。因此, 提高姿态角速率测量精度和姿态角测量精度是减小偏流角估值误差合理、可行的方法。

3.6 多误差参数变化时分析

地心距允许误差和轨道中心角允许误差的变化对偏流角估计误差无影响。因此, 仅针对同时提高姿态角测量精度和姿态角速率测量精度对偏流角估值误差的影响进行仿真和分析。分析方法同上文, 同时提高姿态角测量精度和姿态角速率测量精度的 2~5 倍, 其他参数不变。数据见表 5。

表 5 姿态角速率测量精度和姿态角测量精度取不同值时的偏流角估值误差

Tab.5 Estimate errors of drift angle in different metrical precisions of attitude angle and attitude angle velocity

Metrical precisions of attitude angle/( $^{\circ}$ )	Metrical precisions of attitude angle velocity/( $^{\circ}$ ) $\cdot$ s $^{-1}$	Estimate errors of drift angle/( $^{\circ}$ )
0.15	0.005	19.977 56
0.12	0.004	16.313 76
0.09	0.003	12.119 9
0.06	0.002	7.921 574
0.03	0.001	4.161 827

图 3 中拟合了 3 条曲线: 姿态角测量精度取不同值时的偏流角估值误差曲线(曲线 1)、姿态角速率测量精度取不同值时的偏流角估值误差曲线(曲线 2)、(曲线 3)姿态角速率测量精度和姿态角测量精度取不同值时的偏流角估值误差曲线。可以看出, 同时提高姿

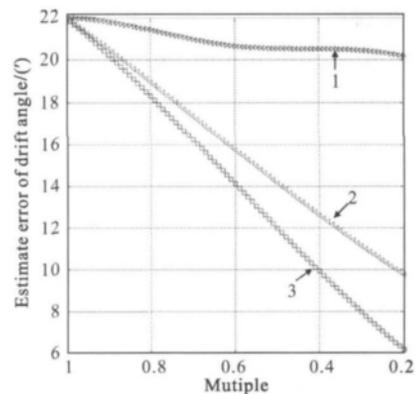


图 3 两个误差参数同时变化时的偏流角误差图

Fig.3 Figure of drift angle error when two error parameters change at the same time

态角测量精度和姿态角速率测量精度对偏流角估值误差的减小大于单独提高姿态角测量精度或姿态角速率测量精度对偏流角估值误差的减小,并且大于单独提高姿态角测量精度或姿态角速率测量精度时偏流角估值误差减小的叠加。从表 3 和表 4 可以得出,同时减小姿态角测量精度和姿态角速率测量精度至原值 2/5 时,偏流角估值误差值与仅减小姿态角速率测量精度至原值 1/5 时的偏流角估值误差值相差很小,仅  $0.166912'$ 。姿态角测量精度和姿态角速率测量精度的提高是相辅相成的,同时提高两个参数,是减小偏流角计算值的最好策略。

#### 4 结 论

作为 TDI CCD 空间相机,偏流角误差统计是对空间相机能否正常工作的一个预估,直接影响空间相机的研制及工作策略。虽然偏流角估值误差是根据 TDI CCD 相机各参数的随机误差合成的,是基于仿真的研究结果,但它是通过科学的方法得到的,是在地面条件无法模拟空间相机工作实况的情况下的一种合理、可行的分析方法,是对空间相机能否可靠的拍摄出清晰图像的一个重要评估。姿态角测量精度提和姿态角速率测量精度的提高对减小偏流角估值误差是相辅相成的,同时提高两个参数是减小偏流角估值误差,优化偏流角计算值的最好策略。由于偏流角计算模型比较复杂,采取了蒙特卡罗法对偏流角估值误差进行统计。随着 TDI CCD 空间相机分辨率的不断提高,对匹配误差的要求也会更加严格,如何合理分配和处理影响偏流角估值误差的各参数的误差,以减小偏流角估值误差,使相机能够更可靠地拍摄出清晰图像,还需要更多的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] Mei Suisheng. Photoelectron Technique [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)  
梅遂生. 光电子技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [2] Washkurak W D. High speed, low noise, fine resolution TDICCD imagers [C]//SPIE, 1990, 1242: 252-263.
- [3] Fan Chao, Li Yingcai, Yi Hongwei. Analysis of drift angle on space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S2): 216-220. (in Chinese)  
樊超, 李英才, 易红伟. 空间相机中的偏流角的分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S2): 216-220.
- [4] Xu Zhihai, Chen Yueting, Wang Qi, et al. Image tremble compensation for space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 593-596. (in Chinese)  
徐之海, 陈跃庭, 王琦, 等. 面阵空间相机稳像补偿研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 593-596.
- [5] Liu Zhaojun, Chen Wei. Space applications of staring imaging technology with area FPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 541-545. (in Chinese)  
刘兆军, 陈伟. 面阵凝视型成像空间应用技术 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 541-545.
- [6] Parrish Jr E A, Goksel A K. A camera model for natural scene processing [J]. *Pattern Recognition*, 1977, 9: 131-136.
- [7] Shi Guanghui. The effect of image motion on the quality of the images formed for the satellite photography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(4): 31-34. (in Chinese)  
史光辉. 像移对卫星摄影成像质量的影响[J]. 光学精密工程, 1997, 5(4): 31-34.
- [8] Long Funian, Zhang Wang. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3): 382-384. (in Chinese)  
龙夫年, 张旺. 卫星姿态精度对 TDI CCD 相机的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 382-384.
- [9] Zhu Benren. Introduce of Mont Carlo Method [M]. Jinan: Shangdong University Press, 1986. (in Chinese)  
朱本仁. 蒙特卡罗方法引论[M]. 济南: 山东大学出版社, 1986.
- [10] Wang Jiaqi. Optical Instrument Collectivity Design [M]. Changchun: 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, 1998.