亚角秒级星相机的精度测定

王伟之,王 妍,于艳波,邸晶晶,宗云花,高卫军

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘 要: 星相机的指向精度是评价星相机性能的最重要的指标。提出了针对亚角秒级星相机的实验室精度测定方法。基于静态多星靶标和平行光管完成了瞬态误差(Temporal Error,TE)的测量,并考虑了星相机实际使用时的信号水平;采用 Stewart 平台进行微距调整,通过帧间差分处理获取同名星点间的坐标差,经统计分析可以得到高频误差 HSFE,优点是避免了规划特殊路径;通过使用不同谱段的滤光片,等效计算得到色差导致的低频误差 LSFE;此外,还给出了星相机畸变标定导致的低频误差和星点靶标标记误差导致的低频误差。试验结果与设计值一致,验证了上述方法的有效性。

关键词: 星相机; 精度; 误差

中图分类号: V416.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0917002

Accuracy determination for sub-arcsec star camera

Wang Weizhi, Wang Yan, Yu Yanbo, Di Jingjing, Zong Yunhua, Gao Weijun

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Pointing accuracy is the most important parameter to evaluate the performance of the star camera. Laboratory accuracy determination methods for sub-arcsec star camera were presented. Temporal error (TE) was tested with static multiple stars target and collimator considering real signal level of the star camera. Stewart platform was used to adjust the camera with micro-steps, inter-frame difference method was applied to obtain relative distance of tie-points, then high spatial frequency error (HSFE) was calculated with statistics method with the benefit of avoiding planning special paths. Low spatial frequency error (LSFE) introduced by chromatic aberration was measured equivalently with different kind of optical filters; moreover, LSFE in distortion calibration and target measurement was calculated. Test is taken and the result is in line with design value, the validity of the above methods is verified.

Key words: star camera; accuracy; errors

收稿日期: 2018-04-05; **修订日期:** 2018-05-03

基金项目: 中国科协青年人才托举计划(2015-2017)

作者简介: 王伟之(1984-),男,高级工程师,硕士,主要从事空间光学遥感器方面的研究。Email:wzwang3041@126.com

0 引 言

星相机(或星敏感器)至少具备视场扫描并能输出视场内星点定位信息的能力[1],具有姿态测量精度高的特点,在航天光学遥感卫星领域具有重要的应用价值[2-3]。影响星相机精度的误差源较多[1,4],高精度的地面标定方法是当前的一个研究热点[5-8]。张广军研究组采用内外参联合求解的方法完成了星敏感器的高精度标定[5-6],主要考虑的误差是瞬态误差(Temporal Error,TE)、低频误差(Low Spectrum Frequency Error,LSFE)以及高频误差(High Spectrum Frequency Error,HSFE),参考文献[7]所采用的方法类似。然而实际工程应用中,受设计、加工、装调等因素限制,星相机不可避免的存在色差,色差将导致的星点质心位置变化误差,由于这种误差难以消除[4],将直接影响星相机的指向精度,对于亚秒级高精度星相机而言,这种误差不可忽略[8]。

文中针对亚秒级精度星相机的主要误差进行了分类,对实验室误差测试方法进行了说明,最后给出了试验室测试结果并进行了分析和总结。

1 误差分类及测试方法

1.1 主要误差分类

按照参考文献[1]分类,星敏感器测量误差主要可分为偏置误差(Bias Error,BE)、热弹性误差、视场空间误差、像素空间误差、暂态噪声、光行差等。其中偏置误差和光行差可通过系统校正手段弥补,影响可以忽略[4]。热弹性误差与在轨使用环境相关[9],不展开讨论。对于 LEO 卫星,视场空间误差表现为时域低频有色噪声,像素空间误差和暂态噪声表现为高频白噪声[4],因此与星相机自身相关的又可按照 TE、LSFE、HSFE 进行分类[1]。

TE 由暂态噪声导致,主要包括:星点信号的散粒噪声、背景和暗电流带来的散粒噪声、读取噪声、量化噪声、数据噪声、TE 取决于曝光时间和探测器温度。

LSFE 源主要包括:(1) 视场内的点扩散函数变量;(2) 焦距校准残差(包括温度稳定性)和光学畸变(色差);(3) 由于在四元数水平上而非星点水平上校正导致的光线偏差残差;(4) 探测器,线膨胀系数(CTE)影响(包括由于辐射导致的退化);(5) 星表误差。

HSFE 源主要包括:探测器光子响应非一致性;探测器暗信号不一致性探测器暗电流尖峰(是否相关取决于探测器技术);探测器固定模式噪声(是否相关取决于探测器技术);星点质心计算误差(插值误差)。

由于星相机是在星点层面处理对于 LSFE,无第(3)项误差,因此第(4)项误差可通过采取低膨胀探测器支撑结构设计结合精密温控来消除(退化的影响不讨论),第(5)项误差可通过高精度的星表修正解决,误差一般很小可忽略。

1.2 TE 测试方法

TE 测试方案如图 1 所示,星相机首先与 Stewart 平台一体安装,之后与平行光管对准。三者共同安置于光学隔震平台上。平行光管焦平面处安置 5×5 星点靶标,光源照亮星点靶标经平行光管及星相机镜头后在星相机焦面成像(需考虑设计时星相机的信噪比),采用帧间差分去噪及质心法[10-11]通过对星点靶标像进行亚像元细分质心提取,统计分析即可得到暂态误差。

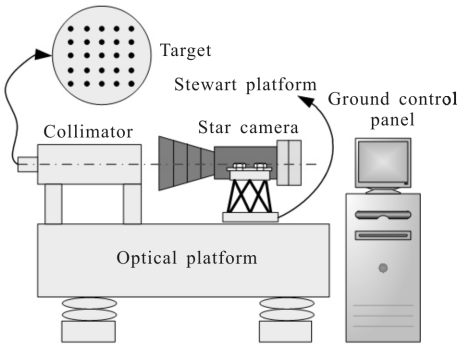

图 1 基于平行光管和星点靶标的 TE 误差测试

Fig.1 TE test with collimator and star target

具体过程如下:在稳定环境连续开启星相机对靶标成像,保存 $N\geqslant 30$ 帧图,计算所有图像的星点质心坐标(单位:pixel),统计每个星点坐标的均方根误差 $\sigma_i(i=1,2,\cdots,N)$。则单个星点对应的暂态误差 TE(($''$)/3σ)计算公式如下:

$$\bar{\sigma}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i \tag{1}$$

$$\mathrm{TE}=3\bar{\sigma}\times 5.5 \tag{2}$$

注：星相机 1 pixel 对应 5.5″。

1.3 HSFE 测试方法

HSFE 测试设备与 TE 一致，区别在于控制 Stewart 平台以微小步距转动星相机，通过统计多次转动条件下星点靶标质心位置之间的变化给出 HSFE。具体过程如下。

工况 1：在连续时间段开启星相机对靶标成像，保存 $N\geqslant 30$ 帧图，计算所有图像的星点质心坐标 $(X_{j,i},Y_{j,i})$，从而可以给出每个星点坐标的均值：

$$\bar{X}_j^{(1)}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_{j,i}^{(1)} \tag{3}$$

$$\bar{Y}_j^{(1)}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}Y_{j,i}^{(1)} \tag{4}$$

式中：$i=1,2,\cdots,N$；$j=1,2,\cdots,W(W=25)$。

工况 2：利用 Stewart 平台微转动，使靶标像移动0.2 pixel(如图 2 所示)，然后重复工况 1，得到工况 2 星点坐标均值$(\bar{X}_j^{(2)},\bar{Y}_j^{(2)})$。

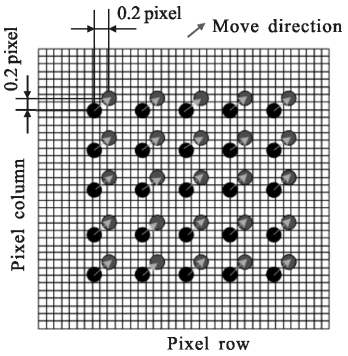

图 2 星点靶标微步距移动示意图

Fig.2 Micro-step move process of star target

工况 3~12：靶标像移动 0.4、0.6、…2 个像，重复工况 1~2，得到工况 3~12 星点坐标均值$(\bar{X}_j^{(3)},\bar{Y}_j^{(3)})$，$\cdots,(\bar{X}_j^{(M)},\bar{Y}_j^{(M)})$，其中 $M=12$。

从工况 2 开始，采用帧间差分方法，分别计算每个工况相比于前一个工况条件下对应 25 个星点坐标之间的差：

$$\Delta\bar{X}_j^{(k)}=\bar{X}_j^{(k+1)}-\bar{X}_j^{(k)} \tag{5}$$

$$\Delta\bar{Y}_j^{(k)}=\bar{Y}_j^{(k+1)}-\bar{Y}_j^{(k)} \tag{6}$$

根据第工况 4 计算结果，分别统计每组$(\bar{X}_j^{(k)},\bar{Y}_j^{(k)})$(共 11 组)内 25 个星点相对于各组均值的残差。

$$\delta\bar{X}_j^{(k)}=\Delta\bar{X}_j^{(k)}-\frac{1}{W}\sum_{j=1}^{W}\Delta\bar{X}_j^{(k)} \tag{7}$$

$$\delta\bar{Y}_j^{(k)}=\Delta\bar{Y}_j^{(k)}-\frac{1}{W}\sum_{j=1}^{W}\Delta\bar{Y}_j^{(k)} \tag{8}$$

式中：$k=1,2,\cdots,M-1$。统计所有组的残差$(\delta\bar{X}_j^{(k)},\delta\bar{Y}_j^{(k)})$，求均方差，进而得到高频误差 HSFE($3\sigma$)。

$$\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{W}(\delta\bar{X}_j^{(k)})^2}{W\cdot(M-1)}} \tag{9}$$

$$\sigma_y=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{W}(\delta\bar{Y}_j^{(k)})^2}{W\cdot(M-1)}} \tag{10}$$

$$\mathrm{HSFE}_x=3\sigma_x\times 5.5 \tag{11}$$

$$\mathrm{HSFE}_y=3\sigma_y\times 5.5 \tag{12}$$

1.4 LSFE 测试方法

主要针对色差和畸变校正导致的低频误差进行测试。

1.4.1 色差(低频误差)

基本测量方案与图 1 类似，仅需将靶标移动 3次覆盖 4 个边缘视场，同时在靶标前方放置不同谱段的滤光片进行测试。靶标位置在星相机视场内的位置如图 3 所示。

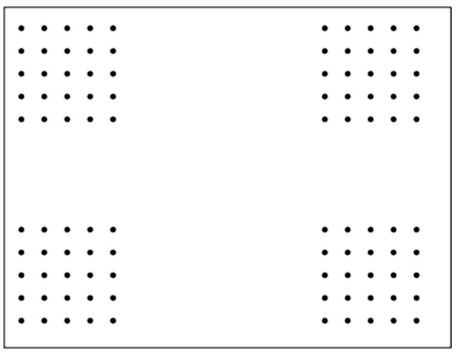

图 3 星点靶标在视场内位置

Fig.3 Star target position in FOV

具体流程如下：

工况 1：靶标位于星相机左上视场，安装 500 nm (带宽 100 nm，下同)滤光片；连续时间段开启星相机对靶标成像，至少保存 $N=30$ 帧图，计算所有图像的星点质心坐标$(X_{j,i},Y_{j,i})$，从而可以给出每个星点坐标的均值：

$$\bar{X}_j^{(1)}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_{j,i}^{(1)} \tag{13}$$

$$\bar{Y}_j^{(1)}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}Y_{j,i}^{(1)} \tag{14}$$

式中：$i=1,2,\cdots,N$；$j=1,2,\cdots,W(W=25)$，安装 600 nm 滤光片，重复。

工况 2：安装 800 nm 滤光片，重复工况 1，靶标移动到星相机视场右上角，重复；

工况 3：靶标移动到星相机视场左下角，重复；

工况 4：靶标移动到星相机视场右下角，重复；针对每个工况，以 600 谱段星点坐标为基准，计算不同谱段下 5×5 星点中每个星点之间的距离。

$$\begin{cases}\delta_{jX(600-500)}^{(k)}=\bar{X}_{j600}^{(k)}-\bar{X}_{j500}^{(k)}\\ \delta_{jY(600-500)}^{(k)}=\bar{Y}_{j600}^{(k)}-\bar{Y}_{j500}^{(k)}\\ \delta_{jX(800-600)}^{(k)}=\bar{X}_{j800}^{(k)}-\bar{X}_{j600}^{(k)}\\ \delta_{jY(800-600)}^{(k)}=\bar{Y}_{j800}^{(k)}-\bar{Y}_{j600}^{(k)}\end{cases} \tag{15}$$

式中：$k=1,2,3,4$。

根据以上步骤对所有工况下不同谱段相对 600 谱段之间的星点距离计算均值并除 2，得到各视场下不同谱段相对于 600 谱段的星点位置误差$\bar{\delta}$；考虑实际上恒星光谱的分布[7]与用滤光片计算的差异，根据器件参数与镜头透过率估计，得到的结果除以 3 可近似为色差导致的星点低频误差 $\sigma_{\mathrm{LSFE-S}}$。

$$\begin{cases}\bar{\delta}_{X(600-500)}=\dfrac{\sum_{k=1}^{4}\sum_{j=1}^{W}\delta_{jX(600-500)}^{(k)}}{2W\times4}\\ \bar{\delta}_{Y(600-500)}=\dfrac{\sum_{k=1}^{4}\sum_{j=1}^{W}\delta_{jY(600-500)}^{(k)}}{2W\times4}\\ \bar{\delta}_{X(800-600)}=\dfrac{\sum_{k=1}^{4}\sum_{j=1}^{W}\delta_{jX(800-600)}^{(k)}}{2W\times4}\\ \bar{\delta}_{Y(800-600)}=\dfrac{\sum_{k=1}^{4}\sum_{j=1}^{W}\delta_{jY(800-600)}^{(k)}}{2W\times4}\end{cases} \tag{16}$$

1.4.2 畸变标定残差

由畸变标定导致的低频误差测试方法参考文献[5]，基本测量方案见图 1，仅对靶标进行替换，采用预先标定好的静态网格状星点靶标进行测试，如图 4 所示。

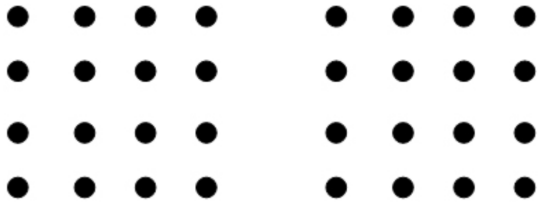

图 4 标定用星点靶标

Fig.4 Star target for calibration

过程如下：

(1) 在连续时间段开启星相机对靶标成像，保存 $N\geqslant30$ 帧图，计算所有图像的星点质心坐标$(X_{j,i},Y_{j,i})$，计算每个星点坐标的均值$(\bar{X}_j,\bar{Y}_j)$：

$$\bar{X}_j=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_{j,i} \tag{17}$$

$$\bar{Y}_j=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}Y_{j,i} \tag{18}$$

式中：$i=1,2,\cdots,N$；$j=1,2\cdots,W(W=32)$。

(2) 计算星点坐标的均值$(\bar{X}_j,\bar{Y}_j)$与标定靶标对应星点的坐标值$(\bar{X}_j^{(0)},\bar{Y}_j^{(0)})$之残差。

$$\delta X_j=\bar{X}_j-\bar{X}_j^{(0)} \tag{19}$$

$$\delta Y_j=\bar{Y}_j-\bar{Y}_j^{(0)} \tag{20}$$

(3) 计算$(\delta X_j,\delta Y_j)$均值与标准差。

$$\overline{\delta X}=\frac{1}{W}\sum_{j=1}^{W}\delta X_j \tag{21}$$

$$\overline{\delta Y}=\frac{1}{W}\sum_{j=1}^{W}\delta Y_j \tag{22}$$

$$\sigma_{\delta X}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{W}(\delta X_j-\overline{\delta X})^2}{W-1}} \tag{23}$$

$$\sigma_{\delta Y}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{W}(\delta Y_j-\overline{\delta Y})^2}{W-1}} \tag{24}$$

(4) 通过星点坐标$(\bar{X}_j^{(0)},\bar{Y}_j^{(0)})$以及残差$(\delta X_j,\delta Y_j)$，采用最小二乘法对畸变进行三次多项式拟合得到拟合后的残差估计值$(\hat{\delta}X_j,\hat{\delta}Y_j)$，计算残差估计值与残差之差：

$$\Delta\delta X_j=\delta X_j-\hat{\delta}X_j \tag{25}$$

$$\Delta\delta Y_j=\delta Y_j-\hat{\delta}Y_j \tag{26}$$

(5) 计算$(\Delta\delta X_j,\Delta\delta Y_j)$标准差：

$$\sigma_{\Delta\delta X}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{W}(\Delta\delta X_j-\overline{\Delta\delta X})^2}{W-1}} \tag{27}$$

$$\sigma_{\Delta\delta Y}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{W}(\Delta\delta Y_j-\overline{\Delta\delta Y})^2}{W-1}} \tag{28}$$

(6) 根据上述计算结果,计算低频误差:

$$\sigma_{\mathrm{LSFE-C1}x}=\sqrt{\sigma_{\delta X}^2-\sigma_{\Delta\delta X}^2} \tag{29}$$

$$\sigma_{\mathrm{LSFE-C1}y}=\sqrt{\sigma_{\delta Y}^2-\sigma_{\Delta\delta Y}^2} \tag{30}$$

1.4.3 标记位置误差

由于星相机精度高，采用星点靶标进行畸变标定时还需考虑靶标本身的标定精度，该误差也会带入畸变标定过程中，其精度取决于所采用的标定仪器,误差记为 $\sigma_{\mathrm{LSFE-C2}}$。

1.4.4 低频误差合成

上述误差部分具有一定相关性，综合考虑总的低频误差按下式合成:

$$\sigma_{\mathrm{LSFE}}=\sqrt{\sigma_{\mathrm{LSFE-S}}^2+(\sigma_{\mathrm{LSFE-C1}}+\sigma_{\mathrm{LSFE-C2}})^2} \tag{31}$$

2 测试结果及分析

某中小视场高精度星相机主要参数如下：探测器采用两个 2 048×2 048 像元面阵 CMOS 器件拼接而成,单个像元张角 5.5″。

主要测试设备:(1) 自研平行光管、光源及靶标等;(2) PI 高精度六自由度转台(H840)。

测试条件:(1) 温度 20 ℃±1 ℃;(2) 10 万级洁净间;(3) 光学隔振气浮平台;(4) 星点靶标亮度按照星相机探测能力匹配,优于 7.5 等星。

2.1 TE 测试结果

TE 测试结果如图 5 所示。

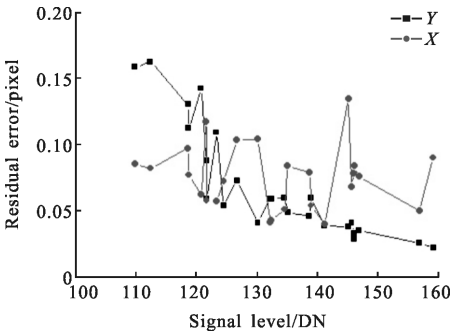

图 5 不同信号水平下星点位置标准差

Fig.5 Standard deviation error with different signal level

按照公式(1)、(2),单个星点 TE 误差为:

$\sigma_{\mathrm{TE}x}=1.14''(3\sigma)$, $\sigma_{\mathrm{TE}y}=1.23''(3\sigma)$。

2.2 HSFE 测试结果

高频误差测试结果如图 6 所示。

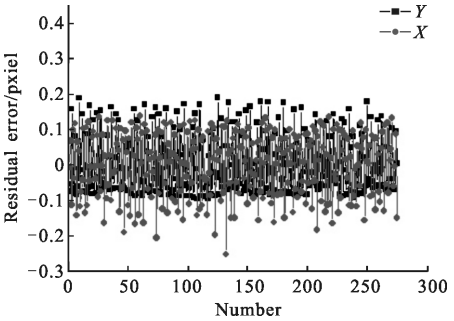

图 6 HSFE 残差

Fig.6 Residual error of HSFE

按照公式(9)~(12),单个星点 HSFE 为:$\sigma_{\mathrm{HSFE}x}=1.08''(3\sigma)$, $\sigma_{\mathrm{HSFE}y}=1.01''(3\sigma)$。

2.3 LSFE 测试结果

2.3.1 低频误差(色差)

由色差导致的低频误差测试经公式(15)整理后如图 7 所示。

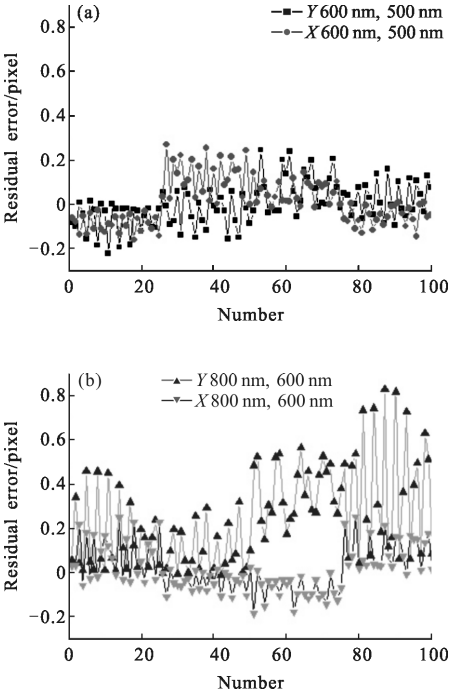

图 7 LSFE 残差(色差)

Fig.7 Residual error of LSFE (chromatic aberration)

进一步的按照公式(16)统计得到表 1。

表 1 不同光谱条件下星点质心误差

Tab.1 Star centroid error with different spectrum

Error/pixel	600-500/nm		800-600/nm	
	X	*Y*	*X*	*Y*
	-1e-4	5e-3	0.12	7e-3

表 1 结果表明，某个星体在探测器上随机分布时，通过在窄光谱范围内改变光谱，该星体中心位置的最大变化为 0.12 pixel。星体位置的估计误差(考虑到恒星光谱内的能量分配) 不超过上表数值的 1/3，最大为 0.04 pixel。

按照公式(10)及 1.4.1 节中的步骤，单个星点由色差导致的低频误差 σ_{LSFE-S} 为：

$$\sigma_{LSFE-Sx}=0.03''(3\sigma)$$

$$\sigma_{LSFE-Sy}=0.66''(3\sigma)$$

2.3.2 低频误差(畸变残差)

星相机畸变标定残差如图 8 所示。

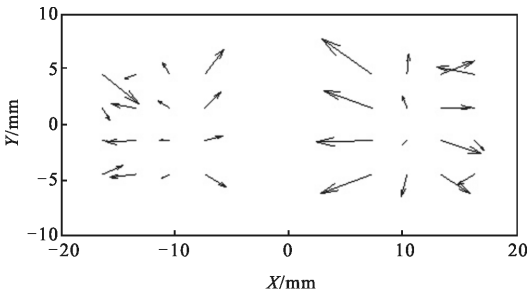

图 8 LSFE 残差(畸变标定)

Fig.8 Residual error of LSFE (distortion calibration)

根据公式(17)~(30)计算得到低频误差：

$$\sigma_{LSFE-C1x}=0.29''(3\sigma)$$

$$\sigma_{LSFE-C1y}=0.41''(3\sigma)$$

2.3.3 标记位置误差

采用高精度全站仪对星点靶标进行标定，按照厂家参数，单个星点的标定误差 $\sigma_{LSFE-C2}$ 为 $0.5''(3\sigma)$。

2.3.4 低频误差合成

按照公式(17)对低频误差进行合成，得到单个星点导致的低频误差：

$$\sigma_{LSFEx}=0.91''(3\sigma)$$

$$\sigma_{LSFEy}=1.12''(3\sigma)$$

2.4 总的合成误差

TE，HSFE，LSFE 三项误差独立，按照误差合成原理，则单星合成误差：

$$\sigma_x=1.76''(3\sigma)$$

$$\sigma_y=1.95''(3\sigma)$$

结合星相机设计探测能力，如采用 10 颗星参与姿态计算，则按照独立参数的平均值的均方根可以得到姿态精度，公式如下：

$$\bar{\sigma}_{x/y}=\frac{\sigma_{x/y}}{\sqrt{N}} \tag{32}$$

式中：N 为参与姿态计算的恒星数量，10 颗；计算得到 X 方向为 $0.56''(3\sigma)$，Y 方向为 $0.62''(3\sigma)$。

3 结 论

根据对影响星相机精度的因素分类，给出了高精度星相机的主要误差实验室测试方法，测试设备采用平行光管和 Stewart 平台，利用不同的静态靶标和滤光片完成了 TE，LSFE，HSFE 的测试。TE 测试中考虑了星相机设计信噪比，数据更接近在轨使用状态；利用不同谱段的滤光片完成了色差导致的 LSFE 测试，通过控制 Stewart 平台沿器件 45°方向微步距移动，对 HSFE 进行了测试，与参考文献[5]的差别在于本方法不需要规定特殊路径，试验易于操作；采用参考文献[5]类似的方法完成了畸变标定残差中 LSFE 的分离，并且考虑了参试靶标本身的误差。最后对上述误差进行了合成，结果表明星相机姿态精度沿 X，Y 方向分别达到 $0.56''(3\sigma)$，$0.62''(3\sigma)$，与设计结果基本一致，验证了测试方法的可行性和有效性。

参考文献：

[1] ECSS-E-ST-60-20C, star sensors terminology and performance specification [S]. Noordwijk: ESA, 2008.

[2] Wang Renxiang. Chinese photogrammetry satellite without ground control points(2)-technical thinking of 1:10000 scale data-transferring photogrammetry satellite [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2014, 35(2): 1-5. (in Chinese)

[3] Wang Xinyi, Gao Lianyi, Ying Ming, et al. Analysis and evaluation of position error of transmission stereo mapping satellite [J]. ***Journal of Geomatics Science and Technology***, 2012, 29(6): 427-434. (in Chinese)

[4] Lu Xin, Wu Yanpeng, Zhong Hongjun, et al. Low frequency error analysis of star sensor [J]. ***Aerospace Control and Application***, 2014, 40(2):1-7. (in Chinese)

[5] Zheng Xunjiang, Zhang Guangjun, Mao Xiaonan. A very

high precision errors test method for star sensor [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(5): 1605-1609. (in Chinese)

[6] Xiong K, Wei X G, Zhang G J, et al. High-accuracy star sensor calibration based on intrinsic and extrinsic parameter decoupling [J]. ***Optical Engineering***, 2015, 54(3): 034112.

[7] Wu Z M, Yang J K, Su D Z. Experimental study for the effects of stellar spectrums on the location accuracy of a star sensor [C]//SPIE, Advances in imaging detectors and applications, 2011, 8194: 819422.

[8] Qiao Peiyu, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Callibration of high-accuracy star sensor [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(10): 2779-2784. (in Chinese)

[9] Chen Cong, Wang Hongli, Cui Xiangxiang, et al. Method of improving real-time of star sensor based on predicting and tracking star catalog [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(8): 2190-2196. (in Chinese)

[10] Sirkis J. System response to automated grid methods [J]. ***Optical Engineering***, 1990, 29(12): 1485-1491.

[11] Li Yingying, Zhao Yongchao, Wu Hao, et al. Detection and correction of bad pixels in large aperture static imaging spectrometer [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2015, 36(5): 76-82. (in Chinese)