一种甚高精度星敏感器精度测试方法

郑循江[1,2],张广军[1],毛晓楠[2]

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

摘　要:根据星敏感器的误差来源和组成,提出了对甚高精度星敏感器的瞬时误差(TE)、高频误差(HSFE)、低频误差(LSFE)三项误差的测试方法。针对星敏感器 TE 的测试,利用统计高精度静态光星模和基于高精度单星模拟器的星点质心定位误差的方法, 得到星敏感器 TE 的误差; 针对星敏感器 HSFE 的测试,利用高精度转台和单星模拟器,以微步距采集星点弥散斑在不同成像位置时的能量变化,计算星敏感器高频误差;针对星敏感器 LSFE 误差的测试,利用双轴转台,并且分别旋转转台的两轴,计算星敏感器星像坐标在像面上的变化来获得 LSFE 的误差。最后文中以某甚高精度星敏感器为例进行试验,结果表明测试方法有效。

关键词:精度测试; 星敏感器; 误差

中图分类号:V416.8　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-2276(2015)05-1605-05

A very high precision errors test method for star sensor

Zheng Xunjiang[1,2], Zhang Guangjun[1], Mao Xiaonan[2]

(1. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Shanghai Aerospace Control and Engineering Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: The errors of star sensor contain temporal error (TE), high spatial frequency error (HSFE) and low spatial frequency error (LSFE). The test methods of the TE, HSFE and LSFE for very high precision star sensor were presented in this paper. The errors of star locations obtained from star image were calculated with the high precision single star simulator. Then the statistics result of TE for the star sensor was calculated with the errors of star locations. The energy change in micro-stepping acquisition of the different star locations from the star image was tested with high precision turntable and single star simulator. The test result of HSFE was calculated with the energy change. The *X* direction errors and *Y* direction errors of the star image were calculated with two axis turntable. Then the LSFE was calculated with *X* direction errors and *Y* direction errors. Finally, the star sensor for satellite control system was tested with the test method presented in the paper. The results show the method is availability. And the method is used for the acceptance test of principle prototype of star sensor.

Key words: precision test; star sensor; errors

收稿日期:2014-09-15; **修订日期**:2014-10-13

基金项目:十二五预研课题(51309040101);飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金

作者简介:郑循江(1976-),男,博士生,主要从事空间光电敏感器方面的研究。Email:goodzxj@163.com

导师简介:张广军(1965-),男,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术方面的研究。

0 引 言

星敏感器是一种高度自主的姿态敏感器，因其具有高精度、低功耗、轻小型、高可靠、长寿命等特点，已经成为卫星上必不可少的姿态敏感器。星敏感器是以“精确”的恒星系统作为观测目标，地面测试时，由于仪器设备难以真实地模拟星空的状态，这使得星敏感器的精度测试一直是星敏感器研制中的难点[1-4]。

现有的中等精度(5~10")、高精度的星敏感器(3~5")的测试方法一般有静态光星模测试、动态光星模测试和外场观星。静态光星模测试可以较为准确地评价星敏感器静态条件下的瞬时误差(TE)，动态光星模可以测试不同角速率条件下的捕获和跟踪性能，但是这两种测试难以准确测试星敏感器的高频误差(HSFE)和低频误差(LSFE)，而这两项误差却是决定产品精度的关键。为了得到较为真实测试，最直接的方法就是在晴朗夜空下进行对天观星。观星测试是评价中等精度、高精度星敏感器精度的有效手段[5-7]。

当前星敏感器的精度指标达到了甚高精度 1"，以上传统的测试方法所带来的误差已经不能满足评价星敏感器精度测试的要求。采用外场观星的方法，虽然可以得到真实的星空图像，但是由于地面受到温度、湿度、大气扰动、蒙气差等的影响，也难以评价甚高精度星敏感器的真实性能。因此，此文针对甚高精度星敏感器的测试需求，研究利用高精度的测试设备，在试验室条件下，对星敏感器的各项误差进行分离测试[8-9]。

星敏感器的精度是由许多误差项构成的，从总体上说，星敏感器自身可以抑制的误差共有三大项，分别是 TE、HSFE、LSFE，和轨道周期相关的误差以及偏置误差和星敏感器的使用条件相关[10]，此文不作讨论。

1 瞬时误差的测试

TE是一种随机误差，暗电流、探测器读出噪声、ADC 量化噪声、电路开关噪声、杂散光都可能产生这种误差。

采用两种方法进行甚高精度 TE 的测试，一是高精度静态光星模测试；二是基于高精度单星模拟器的星点质心定位测试。

1.1 高精度静态光星模测试

采用静态光星模测试可以直接输出星敏感器姿态数据，是一种比较直观的测试方法。星敏感器的观测星数一般须多于 13 颗，因此采用模拟 13 颗星的静态光星模进行测试。以一幅固定的星图呈现，星敏感器连续进行长时间的姿态数据采集(30 min 以上)，以数据拟合的方式统计方差，即可得到静态测试的 TE。

1.2 基于高精度单星模拟器的星点质心定位测试

基于单星模拟器的 TE 测试在暗室进行，测试条件为单星模拟器、二轴转台和测试计算机，转台的位置稳定度须优于 0.3″。如图 1 所示。

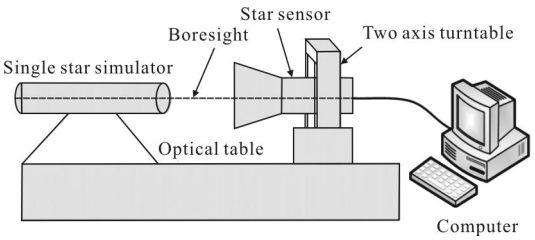

图 1 基于单星模拟器的 TE 测试

Fig.1 TE test with single star simulator

假设星敏感器的视场为 $\Phi 20°$，图像面阵为 2048×2048。随机生成视场范围内的服从二维均匀分布的转台位置序列，序列长度不小于 100。在转台的每个位置，采集星点质心次数不小于 500，计算每个位置处星点质心位置均方根 $\sigma_i(i=1,2,\cdots,N)$。TE 由公式(1)计算。

$$\begin{cases} \overline{\sigma}=\dfrac{1}{N_1}\sum\limits_{i=1}^{N_1}\sigma_i \\ TE=\dfrac{20°}{2\,048}3\sigma \end{cases} \tag{1}$$

2 高频(空间)误差的测试

高频(空间)误差(HSFE)有系统性和随机性的，系统性的高频误差包括两项，一是热变化造成的光学焦平面的偏移，二是由于探测器像元的物理特性造成的星点动态性残差。随机性的高频误差主要来源于暗信号的非一致性、图像响应的非一致性和探测像元的白斑。

由于 HSFE 主要与像元的特性相关，表现形式为

像素频率误差，此文提出一种利用高精度转台和单星模拟器，以微步距采集星点弥散斑在不同成像位置时的能量变化，获得像素高频误差。

一般以像元张角的 1/3~1/4 为微步距，如视场为 $\Phi 20°$，图像面阵为 2 048×2 048，则其单像元张角为 35.2"，探测器的 X 方向和 Y 方向可以分别按 10" 微步长规划路径，采集质心，见图 2。

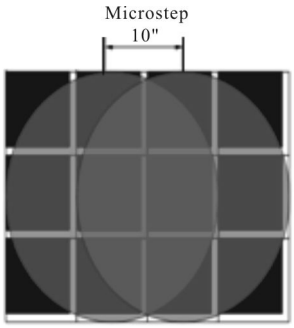

图 2 HSFE 测试的步距图示

Fig.2 HSFE test process

采集路径越多，测量精度越高，对视场为 $\Phi 20°$ 的星敏感器，一般规划以下 6 条转台路径，可较为均匀地覆盖探测器像面，如图 3 所示。

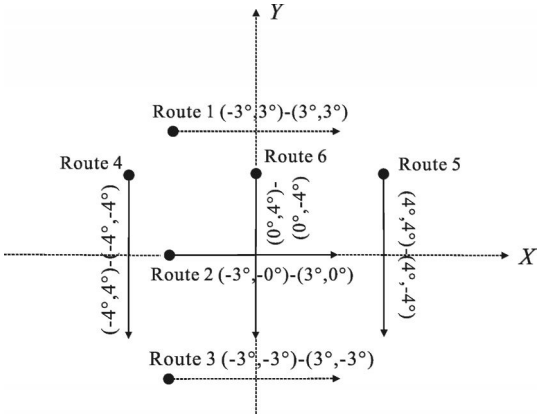

图 3 HSFE 测试转台路径

Fig.3 Route for HSFE test process

对路径 1~3 所得星点质心计算 Y 坐标均方根分别为 σ_{y1}，σ_{y2}，σ_{y3}，对路径 4~6 所得星点质心计算 X 坐标均方根分别为 σ_{x1}，σ_{x2}，σ_{x3}，则 X 和 Y 方向 HSFE 计算如公式(2)和公式(3)，设图像面阵为 2048×2048。

$$\begin{cases}\overline{\sigma_x}=(\sigma_{x1}+\sigma_{x2}+\sigma_{x3})/3\\ HSTE_x=20°/2\,048\cdot 3\overline{\sigma_x}\end{cases}\tag{2}$$

$$\begin{cases}\overline{\sigma_y}=(\sigma_{y1}+\sigma_{y2}+\sigma_{y3})/3\\ HSTE_y=20°/2\,048\cdot 3\overline{\sigma_y}\end{cases}\tag{3}$$

由于 TE、HSFE 和星点质心定位的精度关系密切，姿态数据上反映为噪声特性，所以一般将这两项误差的合成误差称为噪声等效角(NEA)。

3 低频(空间)误差的测试

低频(空间)误差(LSFE)主要是由于温度、光信号、电信号等一些物理量发生缓慢变化造成的误差。低频误差来源于光学系统畸变、热偏移、恒星光谱的差异、探测器平均暗电流的增加、标定残差和星库误差等。由于温度是低频误差最大的影响因素，因此对该项误差进行测试时，要规定温度范围。

同样以视场为 $\Phi 20°$，图像面阵为 2 048×2 048 的星敏感器为例，将产品安装于转台上，转台的回转轴、翻转轴分别与星敏感器的 Y、X 轴重合，初始条件下，单星模拟器发出的平行光沿光轴入射于主点(x_0,y_0)。

在略小于视场的范围内，随机生成服从均匀分布的转台位置序列(α_1,β_1)，(α_2,β_2)，…，(α_N,β_N)，其中(α_i,β_i)，$i=1,2,\cdots,N$ 分别表示转台的回转角、翻转角，取 $N=5\,000$。

在(α_i,β_i)处采集星点质心 M 次，得星矢量集合(x_{i1},y_{i1},z_{i1})，(x_{i2},y_{i2},z_{i2})，…，(x_{iM},y_{iM},z_{iM})，取 $M=20$，按以下步骤得到相关统计量。

(1) 计算星点质心坐标标准差 $\overline{\eta}_x$、$\overline{\eta}_y$

$$\sigma_{xi}=std(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{iM}),\ \eta_{xi}=\sigma_{xi}\frac{20°}{2048}\tag{4}$$

$$\sigma_{yi}=std(y_{i1},y_{i2},\cdots,y_{iM}),\ \eta_{yi}=\sigma_{yi}\frac{20°}{2048}\tag{5}$$

$$\overline{\eta}_x=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\eta_{xi},\ \overline{\eta}_y=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\eta_{yi}\tag{6}$$

(2) 计算星光矢量与测量的星光矢量的夹角 δ_i。以(α_i,β_i)为基准计算的星光矢量与测量的星光矢量均值$(\overline{x}_i,\ \overline{y}_i,\ \overline{z}_i)$的夹角 δ_i，其中

$$(\overline{x}_i,\ \overline{y}_i,\ \overline{z}_i)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}(\overline{x}_{ij},\ \overline{y}_{ij},\ \overline{z}_{ij})\tag{7}$$

(3) 计算 $\delta_i(i=1,2,\cdots,N)$的均值与方差

$$\begin{cases}\overline{\delta}=\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{N}\delta_i\\ \sigma_\delta=std(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_N)\end{cases}\tag{8}$$

采用最小二乘法拟合误差平面 $\delta=f(\alpha,\beta)$，即通过数据集(α_i,β_i)和 $\delta_i(i=1,2,\cdots,N)$，以 3 阶关于 α,β 的多项式拟合 δ，通过拟合公式计算得到$(\hat{\delta}_1,\hat{\delta}_2,\hat{\delta}_N)$，

计算

$$\Delta\delta=\delta_i-\hat{\delta}_i \tag{9}$$

步骤(1)~(3)执行完毕,根据上述统计量,对星敏感器低频误差进行估算。

$$BE=\overline{\delta}_i \tag{10}$$

$$T=std(\Delta\delta_1,\Delta\delta_2,\cdots,\Delta\delta_N) \tag{11}$$

$$LSFE=\sqrt{\sigma_\delta^2-T^2(p)} \tag{12}$$

4 测试结果分析

用某甚高精度星敏感器原理样机进行测试验证分析,视场为 Φ20°,像素阵列 2 048×2 048,单像素张角为 35.2″。测试条件如下:

(1) 温度 20±3 ℃;

(2) 相对湿度 40%~80%;

(3) 大气压力 试验室气压;

(4) 洁净度 100 000 级;

(5) 减震地基或者隔震光学平台。

4.1 TE 的测试结果

分别进行了两种方法测试,结果如下。

(1) 高精度静态光星模测试

甚高星敏感器以 5 Hz 的数据更新率进行姿态采集 30 min,测量的三轴姿态误差曲线如图 4 所示。

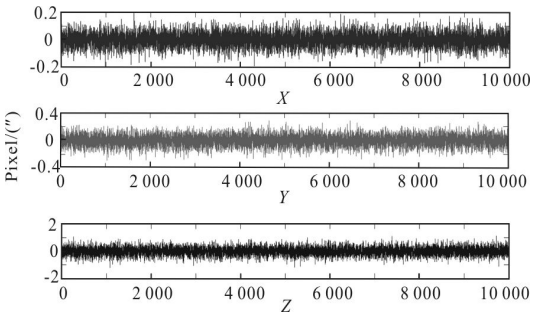

图 4 基于静态光星模的 TE 测试数据

Fig.4 Test data of TE with static star simulator

静态光星模呈现 13 颗恒星, 星敏感器采用 13 颗恒星定姿,TE 统计值(3σ)为:X 方向 0.14″,Y 方向 0.22″,Z 方向 0.85″。

(2) 基于高精度单星模拟器的星点质心定位测试

将星敏感器固定在转台上, 单星模拟器入射于主点,转动转台,使单星模拟器成像于星敏感器像面各处,测试星敏感器提取质心的稳定性。图 5 给出了一幅单星点质心稳定度测试的样本点分布图。

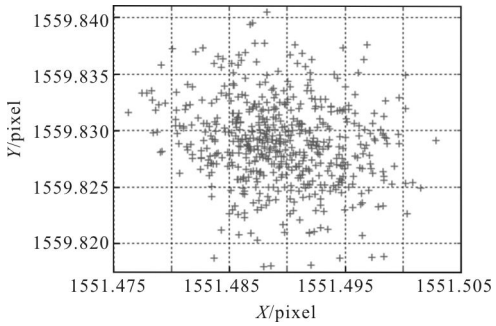

图 5 基于单星模拟器的TE 测试(样本点数 508)

Fig.5 TE test with single star simulator(N=508)

质心定位精度(3σ)平均值统计值:X 方向 0.015 pix,Y 方向 0.023 pix,即单星 TE 统计值(3σ):X 方向 0.528″,Y 方向 0.81″。若采用 13 颗星点定姿,则由以下公式:

$$\sigma_{x/y}=\frac{\sigma_{\alpha\beta}}{\sqrt{N}} \tag{13}$$

则 X 方向 0.146 7″,Y 方向0.224 9″。

可见,以上两种方法测得的 TE 结果基本一致,可相互取代。第一种方法输出三轴欧拉角, 比较直观,但需要研制专用静态星模,成本较大;第二种方法采用通用的单星模拟器和转台就可完成测试,但不能直接评价三轴姿态, 而是通过星点质心定位精度进行等效评估。

4.2 HSFE 测试结果

自点(1 029.5,1 029.05)至点(1 120.10,1 029.55)以 10″微步距移动测试 HSFE 误差的曲线如图6 所示。经图 3 的 6 条路径统计, 单星 HSFE 误差 (3σ):X 方向 0.017 pix,Y 方向 0.019 pix,即 X 方向为 0.598 4",Y 方向为0.668 8"。

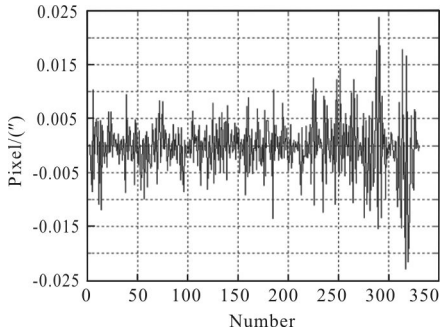

图 6 HSFE 误差测试曲线

Fig. 6 Errors curve of HSFE

由于 TE、HSFE、LSFE 这三个误差成分是独立的,因此得到的单星精度 $\sigma_{\alpha\beta}$(在探测器上单星质心

精确度)是这三个误差项的平方和的开方,即为:

$$\sigma_{\alpha\beta}=\sqrt{TE^2+HSFE^2+LSFE^2} \tag{14}$$

以某次测量为例,单星误差 X 方向分别为(3σ):0.528″(TE)、0.598 4″(HSFE)、2.23″(LSFE),则合成误差为 2.37″,单星误差 Y 方向分别为(3σ):0.81″(TE)、0.668 8″(HSFE)、2.25″(LSFE),则合成误差为 2.48″。

由于单星误差是呈正态随机分布的,而实际使用时,星敏感器同时使用多颗星点进行姿态计算,因此探测上 X/Y 轴的姿态精度 $\sigma_{x/y}$ 随着使用的星数 N 的平方根增加而提高,如下:

$$\sigma_{x/y}=\sigma_{\alpha\beta}\Big/\sqrt{N} \tag{15}$$

根据使用的产品光电参数进行估算,视场中的星数为 13~20 颗,取 N=9 颗星进行计算,则最终得到 X 方向的精度统计值(3σ)为 0.79″,Y 方向的精度统计值(3σ)为 0.83″。Z 轴的精度和视场相关,根据测量坐标系计算得到,对于 Φ20°视场星敏感器,一般可认为误差为 X/Y 的 5~8 倍。

5 结　论

星敏感器精度测试的最大难点就是要最大限度地排除测试设备和环境对测试精度的影响。此文根据星敏感器的误差来源和组成,提出了对甚高精度星敏感器的 TE、HSFE、LSFE 三项误差的测试方法。通过统计星敏感器在高精度静态光星模和单星模拟器输入条件下的星点质心定位误差,得到星敏感器的 TE;利用高精度转台和单星模拟器,以微步距采集星点弥散斑在不同成像位置时的能量变化,计算星敏感器 HSFE;通过将星敏感器固定在双轴转台上,分别旋转转台的两轴,计算星敏感器星像坐标在像面上的变化来获得 LSFE。以上方法已经在产品上进行了验证,实验结果表明,采用该方法可有效得到甚高精度星敏感器的实测精度。

参考文献:

[1] Liebe C C. Accuracy performance of star trckers – a tutorial[J]. ***IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems***, 2002, 38(2): 587–599.

[2] C C Liebe. Star trackers for attitude determination[J]. ***IEEE AES Systems Magzine***, 1995, 31(6): 10–16.

[3] Mortari D. Search–less algorithm for star pattern recognition[J]. ***Journal of the Astronautical Sciences***, 1997, 45(2):179–194.

[4] Scholl M S. Star field identification algorithm performance verification using simulated star field [C]//SPIE, 1993, 2019: 275–290.

[5] Lee H J, Oh C S, Bang H CH. Modified grid algorithm for star pattern identification by using star trackers[C]// 2003 RAST´03, International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2003: 385–391.

[6] Li Baohua, Zhang Yingchun, Li Huayi, et al. Star map recognition method of star sensor using KMP algorithm [J]. ***Opto–electronic Engineering***, 2004, 31(1): 9–11. (in Chinese)
李葆华,张迎春,李化义,等.用 KMP 算法进行星敏感器星图识别的方法[J].光电工程, 2004, 31(1): 9–11.

[7] Li Baohua, Zhang Yingchun, Li Huayi, et al. A star tracking algorithm suitable for star sensor [C]//The 6th Asia –Pacific Conference Fundamental Problems of Opto – and Micro – electronics: APCOM2006, 2006.

[8] Tang Shengjin, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa, et al. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub – pixel detection [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42 (6): 1502–1507. (in Chinese)
唐圣金,郭晓松,周召发,等.星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法[J].红外与激光工程, 2013, 42(6): 1502–1507.

[9] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Gao Yujun, et al. Design of star sensor ground calibration equipment [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(10): 2823–2827. (in Chinese)
孙高飞,张国玉,高玉军,等.星敏感器地面标定设备的设计[J].红外与激光工程, 2013, 42(10): 2823–2827.

[10] 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)
陈聪,王宏力,崔祥祥,等.基于预测跟踪星表提高星敏感器实时性的方法[J].红外与激光工程, 2013, 42(8): 2190–2196.