

浦江一号卫星星敏感器在轨测量精度分析

毛晓楠¹, 周琦¹, 马英超^{1,2}, 闫晓军^{1,2}, 唯乐思¹, 余路伟¹, 尹海宁¹, 张晴³

- (1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;
2. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 201109;
3. 上海应用技术学院 计算机科学与信息工程学院, 上海 201418)

摘要: 针对星敏感器在轨运行时的精度评估问题, 提出了采用历元差法、滑动窗口法和光轴夹角法综合分析的方法, 分别用于评估星敏感器测量噪声, 测量总误差, 并基于浦江一号卫星提供的星敏感器不同类型的在轨数据进行分析计算。在轨测试结果表明: 星敏感器光轴指向精度达到 $15''(3\sigma)$, 满足卫星控制系统要求, 其三轴稳定度达到 0.01° 。该方法可用于星敏感器在轨测量精度评估, 也可用于星敏感器地面观星精度评估。

关键词: 星敏感器; 飞行试验; 精度分析; 姿态测量

中图分类号: P236; P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0517002

Star tracker accuracy analysis of PuJiang Satellite-1 in orbit

Mao Xiaonan¹, Zhou Qi¹, Ma Yingchao^{1,2}, Yan Xiaojun^{1,2}, Wei Lesi¹,
Yu Luwei¹, Yin Haining¹, Zhang Qing³

- (1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;
2. Infrared Detection Research Center of China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China;
3. School of Computer Science and Information Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: For the evaluation of star tracker accuracy on board, a method was proposed using differenced quaternion, sliding window and optical axis included angle to analyse noise equivalent angle, total error of star trackers respectively, based on several kinds of data download from PuJiang Satellite-1 on board. The on board test result shows the optical axis direction accuracy of the star tracker reached $15''(3\sigma)$, meeting the requirement of AOCS, and the three-axis stability reached 0.01° . The method can be used for star tracker accuracy evaluation on board or real sky experiment on ground.

Key words: star tracker; flight test; accuracy analysis; attitude measurement

收稿日期: 2016-09-10; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61522506, 61235011, 51475335)

作者简介: 毛晓楠(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事星敏感器技术方面的研究。Email: meureka@126.com

0 引言

星传感器是迄今为止经飞行验证精度最高的空间飞行器三轴姿态测量部件,星传感器的测量精度直接关系到卫星三轴姿态控制精度,对卫星任务能否顺利完成有着决定性的影响。星传感器精度测试的关键是找到更高精度的参考基准,典型的地面精度测试方法有两种:测角法^[1](基于双轴精密转台与单星模拟器)和观星法^[2](基于外场观星)。鉴于地面试验环境与在轨工作环境差异较大,星传感器在轨精度评估亦十分必要,但由于在轨飞行时很难找到更高精度的姿态测量基准,且耦合因素多,因此在轨精度测试较为困难。李岩等提出可利用相机载荷确定星传感器测量精度^[3],熊凯等提出可利用地标测量星传感器的低频误差^[4],上述方法依赖于特定的环境或设备,实现方式复杂,很难推广至其他类型的卫星。

浦江一号卫星采用太阳同步轨道,主要用于电磁环境监测、国土资源普查、应急搜救等领域,是一颗面向用户订制的快速便捷综合信息服务的小卫星。该卫星作为长征十一号固体运载火箭的首飞载荷,于2015年9月25日在酒泉卫星发射中心发射升空。该卫星配置了上海航天控制技术研究所研制的APS星传感器和CCD星传感器各一台,是上海航天技术研究院首个全部使用国产星传感器,并以此作为姿态测量主份的型号。

文中首先概述星传感器误差,说明精度分析方法,然后基于浦江一号卫星提供的星传感器不同类型的在轨数据,提出了采用历元差法、滑动窗口法和光轴夹角法综合分析星传感器测量精度的方法,最后给出结论。

1 星传感器误差概述

星传感器的误差^[5]通常分为偏置误差(Bias Error, BE)、空间低频误差(Low Spatial Frequency Error, LSFE)、噪声等效角(Noise Equivalent Angle, NEA)三类,其中噪声等效角又可分为空间高频误差(High Spatial Frequency Error, HSFE)和随机误差(Temporal Error, TE),各项误差成因概述如下。

(1) 偏置误差:星传感器测量坐标系与机械坐标

系之间的误差,通常由重力释放或主动段的振动产生,在轨测量常值误差通常基于两台星传感器或星传感器与对地观测的载荷共同评估;

(2) 空间低频误差:分为视场周期低频误差和轨道周期低频误差两类^[6];

1) 视场周期低频误差:随着卫星的运动,恒星在星传感器视场范围内划过,因光学系统畸变、星传感器标定残差、导航星表误差等会随着视场内识别与定姿的恒星体现出来,此项误差为系统误差^[7],波动周期为几十秒到十几分钟不等;

2) 轨道周期低频误差:卫星在轨飞行,星传感器所处热环境会随轨道周期变化,由此带来的安装支架和星传感器本身的热变形将导致星传感器测量值以轨道周期波动,该项误差为轨道周期低频误差的主要组成部分;此外,光行差也属于轨道周期低频误差,但其易于建模修正,因此不作为星传感器低频误差抑制的研究重点。

(3) 噪声等效角:由空间高频误差与随机误差组成;

1) 空间高频误差:随着卫星的运动,恒星的像斑在光电探测器的像斑之间划过,由于像元响应的不均匀性及部分光电探测器的像素填充因此达不到100%,因此会产生星点质心测量值的周期性波动,从而产生姿态测量的空间高频误差^[8];

2) 随机误差:像元读出噪声,A/D转换噪声等电子学系统噪声引起的误差,与时间和空间均不相关,通过提高光电探测成像的信噪比可抑制随机误差。

星传感器姿态测量的总误差(Total error)由公式(1)合成,因偏置误差可通过修改安装矩阵的方式修正,因此不计入总误差^[5,9]:

$$\text{Total_error} = \sqrt{\text{HSFE}^2 + \text{TE}^2 + \text{LSFE}^2} = \sqrt{\text{NEA}^2 + \text{LSFE}^2} \quad (1)$$

2 精度分析方法

2.1 精度分析的数据准备

浦江一号卫星下传的星传感器测量数据有以下组合:

(1) 单台星传感器输出的四元数,对应的时间戳及数据有效标志,下传周期2s;

(2) 在卫星轨道坐标系下,由星传感器输出的四

元数换算的滚动、俯仰和偏航角,下传周期 2 s;

(3) 星载计算机同时采集到的两台星敏传感器输出的四元数,下传周期 16 s;

(4) 星敏传感器数字星图的灰度均值、探测星数、导航星数、定姿星数、两台星敏传感器安装面温度等辅助信息。

2.2 基于历元差法计算噪声等效角

历元差法计算噪声等效角的原理是:通过相邻四元数的差分,计算相邻时刻星敏传感器三轴姿态角增量,该物理量的直流部分体现了卫星的运动,剩余部分体现了星敏传感器姿态测量噪声^[10]。计算步骤描述如下:

(1) 取足够时长的在轨实测姿态四元数序列(一般取一个完整轨道周期实测姿态四元数);

(2) 因在轨姿态数据采样的时间间隔存在误差,采用三次样条插值算法计算从时间起始点至时间终点等间隔的姿态四元数;

(3) 采用历元差法,计算第 i 时刻的四元数 q_i 至第 $i+1$ 时刻的四元数星敏传感器四元数 q_{i+1} 的变化量,见公式(2),其中 \otimes 表示四元数乘法;

$$\Delta q = q_{i+1}^{-1} \otimes q_i \quad (2)$$

(4) 令 $\Delta q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ (文中所用四元数均以 q_0 为标量,下同),将步骤(3)得到的 Δq 转化为三轴欧拉角 x, y, z , 见公式(3)、(4)、(5)、(6)。

$$A = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$x = \arctan\left(-\frac{A_{21}}{A_{22}}\right) = \arctan\left(-\frac{2(q_1 q_2 - q_0 q_3)}{q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2}\right) \quad (4)$$

$$y = \arcsin(A_{23}) = \arcsin[2(q_2 q_3 + q_0 q_1)] \quad (5)$$

$$z = \arctan\left(-\frac{A_{13}}{A_{33}}\right) = \arctan\left(-\frac{2(q_1 q_3 - q_0 q_2)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \quad (6)$$

(5) 基于步骤(4)得到的结果,其直流分量反应了卫星运动信息,为信号的直流分量,去掉直流分量,统计三轴欧拉角的噪声等效角。

应用历元差法评估噪声等效角的注意点如下:

(1) 步骤(2)是必要的,若不做等时间间隔的预处理,得到的噪声要显著大于实际值;

(2) 姿态四元数的采样间隔对分析结果影响较大,当四元数的采样间隔与星敏传感器的曝光周期相近时,如星敏传感器的曝光周期为 100 ms,以 10 Hz 采样四元数,所得结果为 TE,随着采样间隔增大,所得结果将体现 HSFE 的影响,当采样间隔比曝光周期大 10 倍以上时,该方法不适用。

2.3 基于滑动窗口法计算总误差

基于滑动窗口法计算总误差的原理是:在预设宽度的滑动窗口内,基于实测的四元数以 7 阶多项式拟合参考四元数,以此作为基准计算误差,当窗口设定宽度与恒星划过视场时间匹配时,所得误差为除轨道周期低频误差外的姿态测量误差^[11]。

滑动窗口法的计算步骤:

(1) 取足够时长的在轨实测姿态四元数序列(一般取一个完整轨道周期实测姿态四元数);

(2) 设定滑动窗口宽度,典型的太阳同步轨道卫星平飞时星敏传感器光轴划过天球的角速率约为 $0.06(^{\circ})/s$,星敏传感器视场为 20° ,则恒星划过星敏传感器视场的时间最大值为 333 s,恒星划过星敏传感器视场的平均时间约 160 s,现星敏传感器测量数据下传周期为 2 s,因此滑动窗口宽度设置为 $160/2 = 80$;

(3) 在滑动窗口内,设实测的四元数样本点为 $Q_m = \{q_1, q_2, \dots, q_{80}\}$, 对应的时间戳序列为 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_{80}\}$,以 7 阶多项式拟合“时间—四元数”曲线,得到参考四元数曲线 Q_r , 见公式(7)。

$$Q_r = \text{polyfit}(t, Q_m, 7) \quad (7)$$

(4) 按照公式(2)计算实测四元数与参考四元数的变化量,按照公式(3)~(6)转化为三轴姿态角 x, y, z , 可得到姿态误差曲线;

(5) 统计三轴姿态误差。

需要注意的是,使用该方法须考虑卫星平台稳定度对计算结果的影响。地面观星时,可将地球视为三轴稳定度均优于 0.1" 的平台,因此其影响可忽略^[12];但对于三轴稳定的地球卫星,此项因素不可忽略,因此误差计算的结果较地面观星偏大。尽管如此,在卫星不能提供更高精度姿态基准的情况下,该方法仍为评估星敏传感器总误差最有效的方法。

2.4 基于夹角法计算星敏传感器测量误差

浦江一号卫星配置的星敏传感器与卫星本体固联安装,两台星敏传感器的光轴夹角理论上为定值,浦江

一号卫星两星敏传感器光轴夹角的理论值为 25.91°，见图 1。夹角法所得统计值为两星敏传感器测量总误差的合成值。

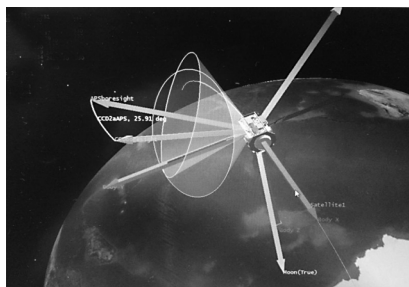


图 1 浦江一号卫星星敏传感器光轴指向夹角示意图

Fig.1 Diagrammatic drawing of optical axis included angle between two star trackers of PuJiang Satellite-1

设 APS 星敏传感器实测的四元数为 $q_{APS}=[q'_0, q'_1, q'_2, q'_3]^T$ ，CCD 星敏传感器实测四元数为 $q_{CCD}=[q''_0, q''_1, q''_2, q''_3]^T$ ，依据公式(3)计算 A_{APS} 及 A_{CCD} ，得到 APS 星敏传感器光轴指向矢量 v_{APS} 和 CCD 星敏传感器光轴指向矢量 v_{CCD} ，分别见公式(8)、(9)。

$v_{APS} =$

$$\begin{bmatrix} 2(q'_1q'_3+q'_0q'_2) & 2(q'_2q'_3-q'_0q'_1) & q'^2_0-q'^2_1-q'^2_2+q'^2_3 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$v_{CCD} =$

$$\begin{bmatrix} 2(q''_1q''_3+q''_0q''_2) & 2(q''_2q''_3-q''_0q''_1) & q''^2_0-q''^2_1-q''^2_2+q''^2_3 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

两台星敏传感器光轴夹角按照公式(10)计算：

$$\alpha = \arccos\left(\frac{v_{APS} \cdot v_{CCD}}{\|v_{APS}\| \|v_{CCD}\|}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (10)$$

使用该方法时应注意：夹角为常量，不随卫星姿态变化改变，仅与星敏传感器、支架或星体温度环境因素相关；此方法需要严格的时间同步，或在后续数据处理中实现数据同步，否则引入的误差较大。

使用该方法时应注意：夹角为常量，不随卫星姿态变化改变，仅与星敏传感器、支架或星体温度环境因素相关；此方法需要严格的时间同步，或在后续数据处理中实现数据同步，否则引入的误差较大。

3 在轨测量数据分析

3.1 飞行产品技术参数

文中重点以 APS 星敏传感器为例做在轨测量数据分析，该产品的设计指标见表 1。

表 1 应用于浦江一号卫星的 APS 星敏传感器技术指标

Tab.1 APS star tracker's technical index used for PuJiang Satellite-1

Technical feature	Technical index	Remarks
Field of view	20°×20°	
Resolution of the sensor	1 024×1 024 pixels	
Angle resolution of each pixel	70.3"	
Focal length	43.56 mm	
Noise equivalent angle (x, y, z, -15~5℃, 9 stars for attitude calculation, 3σ)	5", 5", 35"	Test result(in lab): 3.3", 3.3", 22.0" Test result(in real sky experiment): 3.8", 3.7", 27.6"
Low spatial frequency error(x, y, z, -15~5℃, 3σ)	4", 4", 30"	Test result(in lab): 2.3", 2.3", 18.5" Test result(in real sky experiment): 2.5", 2.7", 20.2"

3.2 计算噪声等效角

APS 星敏传感器在 2015/10/24 17:07:34~20:32:22 时段的测量数据见图 2，图中绘制了该产品四元数、对应的三轴噪声等效角、灰度均值、数据有效标志、探测星数、导航星数和定姿星数。

由图 2 可知，测量噪声与定姿使用的星数相

关，即定姿星数越多，噪声越小，为进一步分析其相关性，统计各时间段的三轴噪声等效角及星数，见表 2。

观察表 2 的统计数据，可以得出以下结论：

(1) 综合观察定姿星数平均值、最大值与最小值三个参数，当定姿星数较多时，APS 星敏传感器三轴噪声等效角较好；

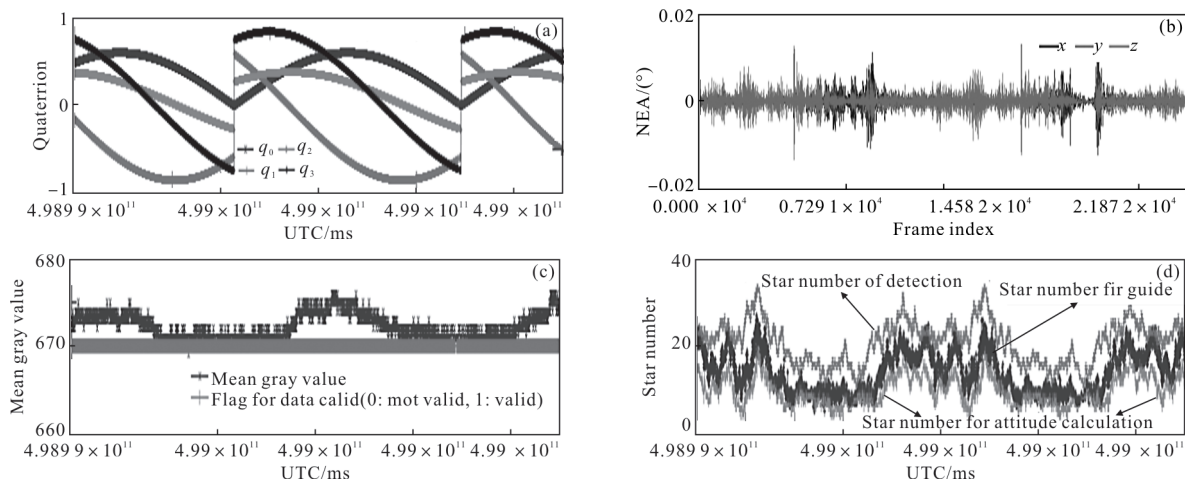


图 2 APS 星敏传感器四元数、三轴噪声等效角(NEA)、星数、数据有效及灰度均值曲线

Fig.2 APS star tracker quaternion, NEA of three axis, star number, data valid flag and mean gray value curve

表 2 噪声等效角与定姿星数关系(2015-10-24)

Tab.2 Relationship between NEA and star number of attitude calculation (2015-10-24)

Star time	End time	NEA			Star number (detection)			Star number (guide)			Star number (attitude calculation)		
		(x, y, z, 3σ, arcsec)	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max		
17:07:34	17:45:42	3.19 6.40 16.94	15.7	6	27	23.9	17	34	10.4	3	20		
18:55:54	19:05:20	4.42 3.91 24.77	14.3	8	26	24.6	19	31	8.2	3	16		
19:05:20	19:20:10	2.94 5.11 13.25	14.8	6	26	24.1	17	34	10.8	5	20		
18:20:44	18:55:52	7.10 9.49 12.01	17.2	7	25	23.8	18	32	11.8	5	18		
19:54:53	20:32:22	6.39 8.61 11.66	17.1	7	24	23.7	18	33	11.6	5	19		

(2) 观察探测星数/导航星数比值 (即视场内实际探测星数与理论上视场内应探测到的星数之比), 当该比值较高时, APS 星敏传感器测量噪声较小, 因此, 当视场内用于定姿的星数较多时, 姿态测量精度较高, 若能设法确保整轨“探测星数/导航星数之比”稳定大于 70%, 则将实现 APS 星敏传感器整轨高精度姿态测量;

需要说明的是, 目前只能得到采样周期为 2 s 的在轨数据, 远大于地面测试时 0.2 s 的采样周期, 因此相对于地面测试的结果, 在轨测试的结果偏大。

3.3 计算总误差

取 APS 星敏传感器在 2015/10/24 17:07:34~20:32:22 时段的测量数据, 其四元数曲线已在图 2 中绘制, 基于滑动窗口法(窗口宽度为 80)计算得到的三轴姿态总误差曲线见图 3。

经统计, 该时段三轴姿态总误差 (3σ) 分别为:

15.40", 16.33", 74.98", 因为不能完全扣除卫星平台稳定性的因素, 故与实验室及外场观星测试结果(见表 2)相比, 基于在轨数据计算的三轴姿态总误差偏大。

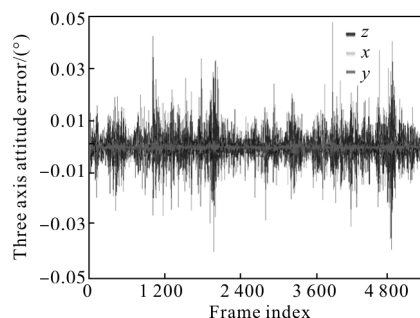


图 3 基于滑动窗口法计算 APS 星敏传感器三轴姿态误差

Fig.3 APS star tracker three axis attitude error based on sliding window calculation

3.4 夹角法分析星敏传感器误差

CCD 星敏传感器与 APS 星敏传感器在 2015/10/24

连续 15 个轨道周期的四元数、轨道幅角、星敏器温度和光轴夹角曲线见图 4。

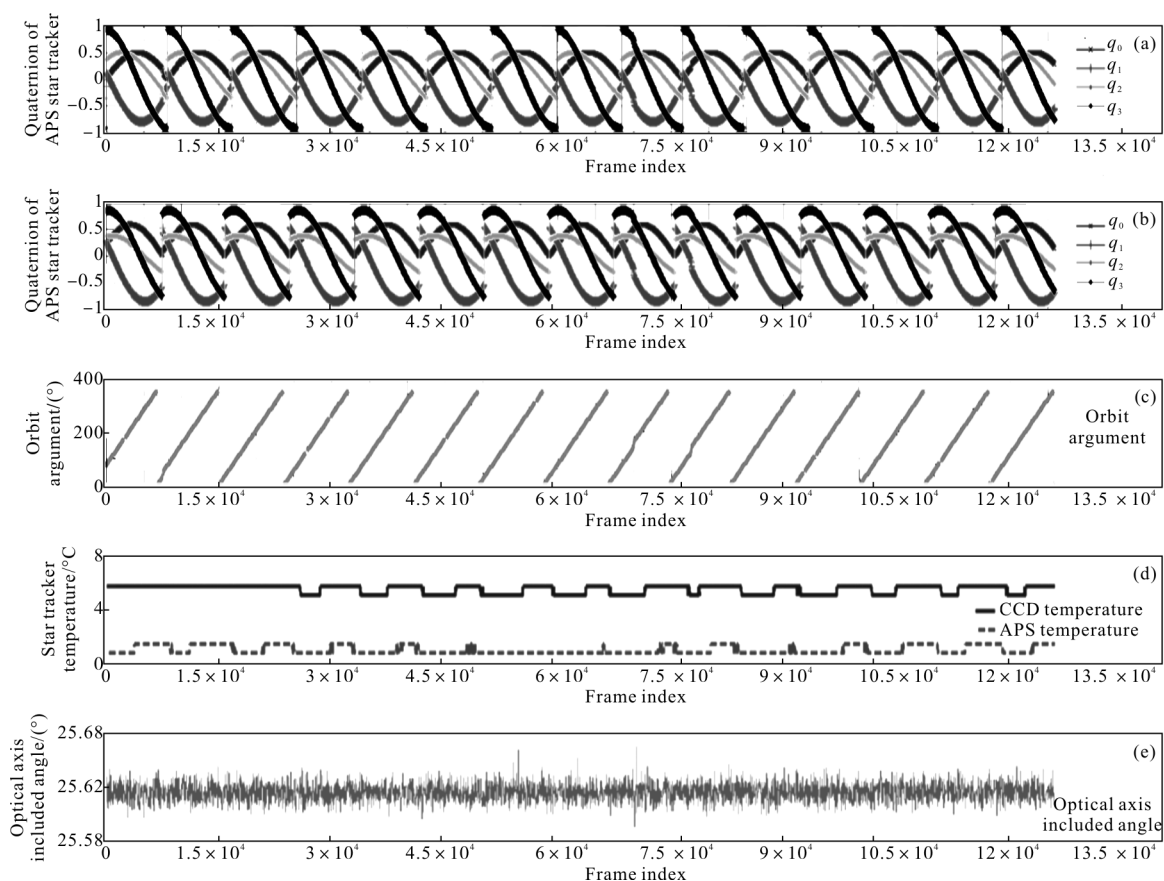


图 4 CCD 星敏传感器与 APS 星敏传感器光轴夹角曲线(2015-10-24)

Fig.4 CCD star tracker and APS star tracker optical axis included angle curve (2015-10-24)

由图 4 可知,在连续的 15 个轨道周期内,两星敏传感器安装面的温度几乎没有变化(波动范围小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$),因此,两星敏传感器光轴夹角曲线没有体现出轨道周期项。

两星敏传感器光轴夹角误差统计值为 $72.5''(3\sigma)$,该值包含了如下误差,分析如下:

(1) 考虑到两星敏传感器曝光中点时刻未做对齐, CCD 星敏传感器积分时间 247 ms, APS 星敏传感器积分时间 330 ms, 则两星敏传感器曝光中点时刻的差值的最小值为 0, 最大值 247 ms, 呈周期波动, 有效值为 175 ms, APS 星敏传感器与 CCD 星敏传感器的光轴均以 $0.06^{\circ}/\text{s}$ 在天球上做圆锥划扫, 因此由曝光不同步导致的光轴夹角误差最大值为 $53.35''$, 有效值为 $37.8''$, 因此扣除曝光时间不同步误差后, 光轴夹角波动值 $34.7''$, 该值是 APS 星敏传感器与 CCD 星敏传感器全部测量误差的合成值;

(2) 假定 APS 星敏传感器与 CCD 星敏传感器误差量级相同, 则两星敏传感器总误差不大于 $24.5''(3\sigma)$ 。

4 结论

文中基于浦江一号卫星提供的数据, 分别采用历元差法、滑动窗口法和夹角法分析了其配置的两台星敏传感器在轨测量精度, 可得出以下结论:

(1) 基于快速下传(周期为 2 s)的星敏传感器姿态测量数据, 使用历元差法评估噪声等效角是有效的;

(2) 基于快速下传(周期为 2s)的星敏传感器姿态测量数据, 基于和滑动窗口法评估总误差(含噪声等效角和视场周期低频误差, 不含道周期低频误差)是有效的;

(3) 基于慢速下传(周期为 16 s)的星敏传感器姿态测量数据, 在考虑两台星敏传感器时间未对齐及温度稳定的前提下使用夹角法, 评估两台星敏传感器的合成误差是有效的。

参考文献:

- [1] Carl Christian Lie be. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587–599.
- [2] Wang Fang. Higher order distortion calibration model of the internal parameters of star tracker camera with the night sky observation[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(1): 84–89.
- [3] Li Yan, Tao Zhigang, Li Songming, et al. Mapping Satellite-1 in-orbit performance evaluation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S1): 40–47. (in Chinese)
李岩, 陶志刚, 李松明, 等. “天绘一号”卫星在轨性能评估[J]. 遥感学报, 2012, 16(S1): 40–47.
- [4] Xiong Kai, Tang Liang, Liu Yiwu. Calibration of star sensor's low frequency error based on landmark information [J]. *Aerospace Control and Application*, 2012, 38 (3): 11–15. (in Chinese)
熊凯, 汤亮, 刘一武. 基于地标信息的星传感器低频误差标定方法[J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38(3): 11–15.
- [5] Schmidt U, Elstner C, Michel K. ASTRO-15 star tracker flight experience and further improvements towards the ASTRO-APS star tracker [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008: 18–21.
- [6] Ludovic Blarre, Julien Ouaknine, Lionel Oddos-marcel. High accuracy sodern star trackers: recent improvements proposed on SED36 and HYDRA star trackers [J]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006: 21–24.
- [7] Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30 (5): 1343–1348. (in Chinese)
钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星传感器标定方法研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1343–1348.
- [8] Wei Xinguo, Xu Jia, Zhang Guangjun. S-curve error compensation of centroiding location for star sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 849–857. (in Chinese)
魏新国, 徐佳, 张广军. 星传感器质心定位的S曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849–857.
- [9] Wang Xingtao, Li Yingchun, Li Xiaoyan. Mapping Satellite-1 star sensor accuracy analysis [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S1): 90–93. (in Chinese)
王兴涛, 李迎春, 李晓燕. “天绘一号”卫星星传感器精度分析[J]. 遥感学报, 2012, 16(S1): 90–93.
- [10] Huo Decong, Huang Lin, Li Yan, et al. An analytical method of star tracker measurement errors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S1): 57–60. (in Chinese)
霍德聪, 黄琳, 李岩, 等. 星传感器在轨测量误差分析[J]. 遥感学报, 2012, 16(S1): 57–60.
- [11] Peter J B, Richard A D. Time Series: Theory and Methods [M]. Tian Zheng, transl. Beijing: China Higher Education Press, 2001.
Peter J B, Richard A D. 时间序列的理论与方法 [M]. 田铮, 译. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [12] Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Accuracy measurement of star trackers based on astronomy [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2012, 52(4): 430–435. (in Chinese)
孙婷, 邢飞, 尤政. 一种基于天体运动学的星传感器精度测量方法[J]. 清华大学学报, 2012, 52(4):430–435.