

高精度星敏感器光学系统误差分析

孙 婷^{1,2} 邢 飞^{1,2*} 尤 政^{1,2}

¹ 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084
² 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 在对影响星敏感器精度的误差源做出权重分析和比较的基础上, 提出一种基于蒙特卡罗模拟的星敏感器精度误差分析方法, 避免冗长和繁琐的理论推导, 直观且系统地分析了星敏感器误差传播关系, 建立星敏感器误差传播模型, 为星敏感器的优化设计、标定补偿提供依据和准则, 通过仿真验证误差传播模型及误差分析方法的准确性, 为高精度星敏感器的设计制造提供重要基础和保证。

关键词 光学器件; 误差模型; 光学系统参数; 星敏感器精度; 蒙特卡罗方法

中图分类号 V241.62⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0323003

Optical System Error Analysis of High Accuracy Star Trackers

Sun Ting^{1,2} Xing Fei^{1,2} You Zheng^{1,2}

¹ Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
² State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract A synthetic error analysis approach is proposed in detail based on error source weight analysis and comparison of the star tracker using Monte Carlo method. It can avoid long and cumbersome theoretical derivation, which can provide error propagation relation of the star tracker intuitively and systematically. The error propagation model can provide foundation and rule for optimization design, calibration and compensation of the star tracker. Simulation consequences prove that the systematic analysis is adequate and precise, which can provide important guarantee for design and manufacture of high accuracy star trackers.

Key words optical devices; error model; optical system parameters; star tracker accuracy; Monte Carlo method

OCIS codes 120.6085; 120.4640; 280.4788

1 引 言

随着对地观测卫星、深空探测卫星姿态测量精度要求的进一步提高, 研究高精度星敏感器精度误差的来源和分析方法, 获得全面而直观的误差传播模型, 进而对误差进行标定和补偿就显得十分重要, 也是不断提高星敏感器精度的必要手段和重要环节。目前已有较多文献对影响星敏感器精度的因素进行了研究和分析^[1~3], 但综合来看, 对误差因素的评价不够系统和全面, 对主要误差因素没有突出分

析; 有些运用了抽象的公式和理论, 难以为星敏感器具体设计提供有效的参考。

本文针对星敏感器光学参数误差^[1,4], 如主点位置偏差、焦距误差、成像平面倾斜误差和畸变, 提出了一种系统精度误差分析方法, 对影响星敏感器精度的误差源给出权重分析和比较, 分析星敏感器误差传播模型, 根据星敏感器精度指标, 对光学参数提出误差范围限制要求, 以此为依据, 可以进一步进行实验室标定。并对所提出的分析方法进行了仿真验证。

收稿日期: 2012-09-11; **收到修改稿日期**: 2012-11-22

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121503)和国家自然科学基金(60807004)资助课题。

作者简介: 孙 婷(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事星敏感器技术方面的研究。

E-mail: suntng09@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 尤 政(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳米技术和微纳卫星技术等方面的研究。

E-mail: yz-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: xingfei@mail.tsinghua.edu.cn

2 星敏感器原理

星敏感器是以恒星为测量对象的高精度姿态测量敏感器件,通过探测地球上不同位置的恒星得到对于天球惯性坐标系的指向。经过多年大量的天文观测,每颗恒星都在天球中具有各自相对固定的位置。恒星在天球球面坐标系中可以以天球球面坐标的赤经和赤纬来表示 (α, δ) 。根据直角坐标与球面坐标的关系,得到恒星在天球直角坐标系下的方向矢量为^[5]

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

从星库中选出满足星敏感器成像条件的恒星组成导航星,并构成导航星表。该导航星表可以在制造的过程中一次性固化到星敏感器的存储器中。

当星敏感器处于天球坐标系中的姿态矩阵 \mathbf{A} 时,利用星敏感器的小孔成像原理,可以通过星敏感器的镜头测量得到导航星 s_i (其对应天球坐标系下的方向矢量为 \mathbf{v}_i)在星敏感器坐标系内的方向矢量为 \mathbf{w}_i ,如图1所示。其中星敏感器的主轴中心在探测器上的位置 (x_0, y_0) ,导航星 s_i 在星敏感器的探测器上的位置坐标为 (x_i, y_i) ,星敏感器的焦距为 f ,则可以得到矢量 \mathbf{w}_i 的表达式为^[6]

$$\mathbf{w}_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - x_0) \\ -(y_i - y_0) \\ f \end{bmatrix}. \quad (2)$$

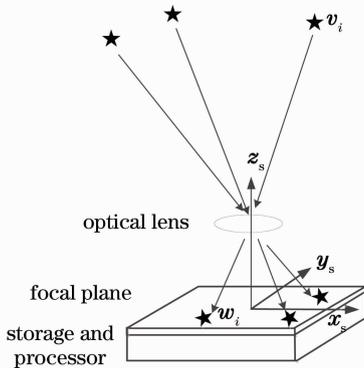


图1 星敏感器理想成像模型

Fig.1 Star sensor ideal imaging model

在理想情况下具有

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{A}\mathbf{v}_i, \quad (3)$$

式中 \mathbf{A} 为星敏感器姿态矩阵。

当观测量多于两颗星时,可以通过常用的QUEST算法^[7]求解星敏感器的姿态矩阵 \mathbf{A} ,即使

得下面的目标函数 $J(\mathbf{A}_q)$ 达到最小值来求出最优姿态矩阵:

$$J(\mathbf{A}_q) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \lambda_i \|\mathbf{w}_i - \mathbf{A}_q \mathbf{v}_i\|^2, \quad (4)$$

式中 λ_i 为加权系数,满足 $\sum \lambda_i = 1$ 。这样,可以计算获得星敏感器在惯性空间中的最优姿态矩阵 \mathbf{A}_q 。

3 星敏感器精度误差分析

3.1 影响星敏感器精度的主要误差因素

根据图1中小孔成像模型及(2)式可以看出,直接影响星敏感器姿态测量结果的因素有星点位置提取误差、主点位置误差、焦距偏差、恒星的方向矢量误差和姿态解算算法误差等。结合整个传感器平面,精度还与视场范围内恒星数量有关。因此,将影响星敏感器姿态测量精度的主要因素进行分类^[8,9]。

3.1.1 星点提取误差

星敏感器对恒星的感知过程由恒星目标、背景辐射、光学系统、光电探测器及信号处理和提取等多环节组成,每一环节都将影响到系统对目标信号的提取质量。决定星点位置提取精度的因素相应地有:恒星的星等和光谱、大气透射率、背景辐射、光学系统的入瞳、光谱、传感器的量子效率、积分时间、噪声、光谱响应、信号提取电路的噪声和星点中心位置提取算法误差等。

恒星距离较远,星光可以认为是平行光,理论上可以在焦平面上会聚在1 pixel内。但目前星敏感器的探测器平面多采用离焦形式^[10],即适当离开成像焦平面,使像点弥散,覆盖多个像元,利用多个像元的能量信号来计算星点位置^[11],从而使星点提取精度达到亚像素级别。可以认为在综合考虑各种影响因素后,星敏感器的提取误差为0.1 pixel,并以此为精度和分析的依据。

3.1.2 星敏感器光学参数误差

实际使用中,由于星敏感器系统存在参数误差如主点偏差、焦距偏差、成像平面的倾斜和畸变等,无法达到理想小孔成像模型,会对星敏感器的姿态求解带来影响,因此必须对以上参数误差进行分析并建立标定补偿模型。

3.1.3 星表误差

恒星数量非常多,但由于存储器容量限制,只能在恒星位置、星等方面进行适当筛选,满足星敏感器全天球工作的要求。筛选出不同的恒星可能会对星

敏传感器视角内的星数量产生影响,影响星敏传感器的指向精度。星表建立时间不同会使恒星在天球坐标系中的矢量有微小影响,也会影响星敏传感器的精度。

3.1.4 星敏传感器内部算法的误差

星敏传感器星图识别方法、姿态解算算法等也会对星敏传感器的精度产生影响。

考虑 3.1.1 和 3.1.2 中的误差源,对目前星敏传感器精度误差的主要来源光学参数误差进行分析,保证星敏传感器的精度。

3.2 星敏传感器误差传播模型

用星敏传感器测量角度误差来表示星敏传感器精度。根据小孔成像模型,测量角度误差表述如下:在视场角范围内从初始垂直入射状态入射光线与主光轴的夹角变化到一定入射角时,入射光线与主光轴的夹角的变化被称为真实光线变化角度;与此过程相似,利用星敏传感器传感器像面上星点坐标值及焦距值计算出的光线与主光轴的夹角也会发生变化,此夹角与计算得到的初始夹角的差值称为计算光线变化角度。计算光线变化角度与真实光线变化角度之间的差值即为测量角度误差。它可以表示星敏传感器对恒星的定位精度,进而得到星敏传感器姿态测量

精度。星敏传感器存在的星点提取误差、主点偏差、焦距偏差、成像平面的倾斜和畸变等误差因素^[12~14],均会对星敏传感器的测量角度误差产生影响,使计算光线变化角度与真实光线变化角度不相等。分析不同误差对星敏传感器测量角度误差影响的大小,就可以保证在一定条件下忽略影响较小的因素,重点标定和补偿影响较大的因素,对星敏传感器精度的提高具有重要意义,也可为星敏传感器的设计提供优化原则。

以下分析中, β_{ri} 表示入射光线与主光轴的夹角, i 表示与入射角相对应的序号, β_{ci} 初始值 β_{r0} 为 0° ,最大值与视场角相等, $\Delta\beta_{ri} = \beta_{ri} - \beta_{r0}$ 表示真实光线变化角度, x_1, x_2 分别表示真实光线入射时星点在像面上理想位置和存在偏差时星点位置。

3.2.1 星点提取误差对星敏传感器单星定位精度影响

星点提取误差示意图如图 2 所示,假设坐标轴 e_1 方向沿星点提取误差幅值最大方向,计算得到的入射光线与理想主光轴方向之间的夹角为 β_{ci} , $\Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}$ 为计算光线变化角度。 $\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri}$ 的最大差值表示由传感器星点提取误差 Δx 带来的星敏传感器测量角度误差的最大值:

$$\begin{cases} \Delta\beta_{ri} = \beta_{ri} - \beta_{r0}, & \beta_{r0} = 0 \\ \Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}, & 0 \leq \beta_{c0} \leq \arctan(\Delta x / f) \\ (\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri})_{\max} = \beta_{ci} - \beta_{ri} = \arctan\left(\frac{f \tan \beta_{ri} + \Delta x}{f}\right) - \beta_{ri} \end{cases} \quad (5)$$

3.2.2 主点变化对星敏传感器单星定位精度影响

考虑入射光线与主点偏差最大的方向共面时,主点误差示意图如图 3 所示,假设 e_1 沿主点偏差最大方向, e_3 为理想主光轴方向, e'_3 为实际主光轴方向。由于主点实际位置与理想位置存在偏差,计算得到的入射光线与理想主光轴方向之间的夹角为 β_{ci} , $\Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}$ 为计算光线变化角度。 $\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri}$ 的最大差值表示主点位置偏差 Δs 带来的星敏传感器测量角度误差的最大值:

$$\begin{cases} \Delta\beta_{ri} = \beta_{ri} - \beta_{r0}, & \beta_{r0} = 0 \\ \Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0} \\ (\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri})_{\max} = \beta_{ci} - \beta_{c0} - \beta_{ri} = \arctan\left(\frac{f \tan \beta_{ri} + \Delta s}{f}\right) - \beta_{c0} - \beta_{ri} \end{cases} \quad (6)$$

在光线入射方向与主点偏差共面,成 α 夹角时,相同入射角度情况下,星敏传感器测量角度误差随 α 的变化趋势如图 4 所示。

可见在 $\alpha=0^\circ$ 或 $\alpha=180^\circ$ 时,即入射光线与主点偏差最大值在同一平面内时,同一入射角度下,星敏传感器测量角度误差大于其他情况下的值,因此,图 3 分析的入射光线与主点偏差最大值共面的情况可以代表主点偏差的最恶劣情况,具有典型性和代表性。

3.2.3 焦距变化对星敏传感器单星定位精度影响

由于焦距存在偏差,计算出的光线与主光轴夹角 β_{ci} , $\Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}$ 为计算光线变化角度。 $\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri}$ 的最大差值表示焦距偏差 Δf 带来的星敏传感器测量角度误差的最大值,具体公式见(7)式。焦距误差影响示意图如图 5 所示。

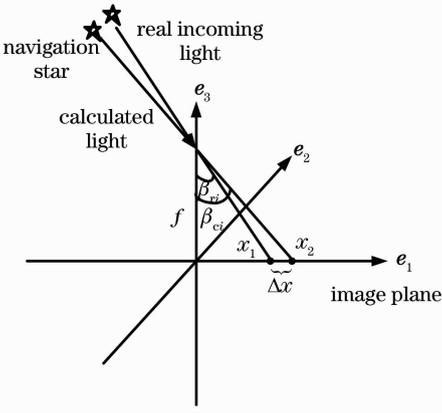


图 2 星点提取误差影响示意图

Fig. 2 Sketch of influence of star position extraction error

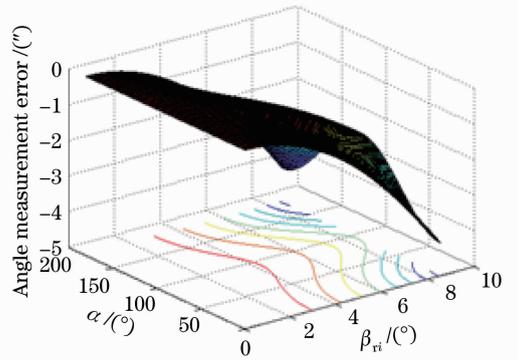


图 4 不同入射方向时,主点误差影响结果

Fig. 4 Influence of principle-point error in different incoming directions

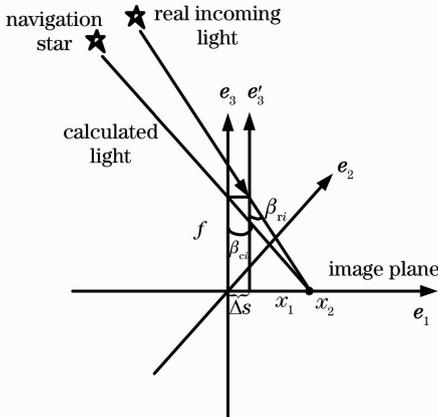


图 3 主点误差示意图

Fig. 3 Sketch of principle-point error

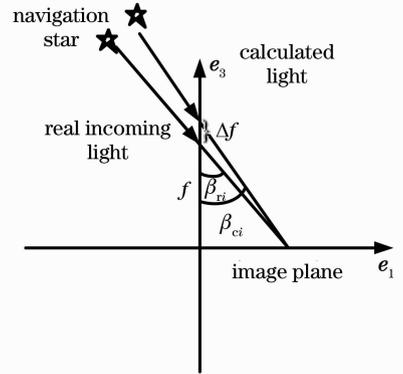


图 5 焦距误差示意图

Fig. 5 Sketch of focal length error

$$\begin{cases} \Delta\beta_{ri} = \beta_{ri} - \beta_{r0}, & \beta_{r0} = 0 \\ \Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}, & \beta_{c0} = 0 \\ (\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri})_{\max} = \beta_{ci} - \beta_{ri} = \arctan\left[\frac{(f + \Delta f) \tan \beta_{ri}}{f}\right] - \beta_{ri} \end{cases} \quad (7)$$

3.2.4 像面倾斜对星敏感器单星定位精度影响

像面倾斜影响示意图如图 6 所示,假设 e_1 沿传感器倾斜角最大方向。由于传感器平面倾斜,使实际星点位置坐标与理想星点位置坐标不相等,利用实际星点位置坐标得到计算光线与主光轴的夹角 β_{ci} , $\Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}$ 为计算光线变化角度。 $\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri}$ 的最大差值表示传感器平面倾斜角度 θ 带来的星敏感器测量角度误差的最大值:

$$\begin{cases} \Delta\beta_{ri} = \beta_{ri} - \beta_{r0}, & \beta_{r0} = 0 \\ \Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}, & \beta_{c0} = 0 \\ (\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri})_{\max} = \beta_{ci} - \beta_{ri} = \arctan\left[\frac{f \tan \beta_{ri} \sin(90^\circ + \beta_{ri})}{f \sin(90^\circ - \theta - \beta_{ri})}\right] - \beta_{ri} \end{cases} \quad (8)$$

3.2.5 畸变对星敏感器单星定位精度影响

由于镜头畸变,使实际星点位置坐标与理想小孔成像得到的星点位置坐标产生偏差,畸变影响示意图如图 7 所示。计算入射光线与主光轴夹角为 β_{ci} , $\Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}$ 为计算光线变化角度。两者之间的偏差即为星敏感器测量角度误差。 $\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri}$ 的最大差值表示由传感器畸变 Δd 带来的星敏感器测量角度误差的最大值,具体公式见(9)式。

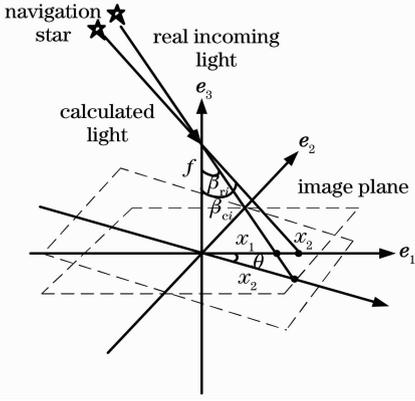


图 6 焦倾斜角误差示意图

Fig. 6 Sketch of incline angle error of image plane

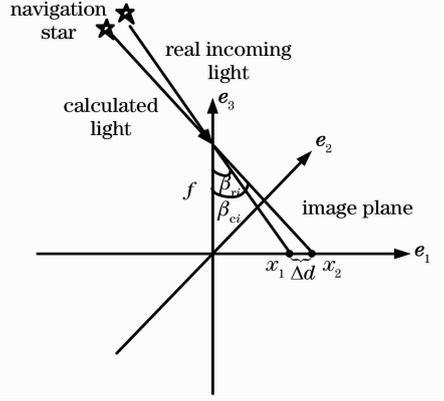


图 7 畸变影响示意图

Fig. 7 Sketch of distortion

$$\begin{cases} \Delta\beta_{ri} = \beta_{ri} - \beta_{r0}, & \beta_{r0} = 0 \\ \Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}, & \beta_{c0} = 0 \\ (\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri})_{\max} = \beta_{ci} - \beta_{ri} = \arctan\left(\frac{f \tan \beta_{ri} + \Delta d}{f}\right) - \beta_{ri} \end{cases} \quad (9)$$

3.2.6 综合影响分析

与上述分析方法思路相同,考虑各误差因素的综合影响后,建立完整误差传播模型如图 8 所示, $A'B'$ 表示入射真实光线, AB 表示计算出的光线, O 点表示理想主点位置, O' 点表示实际主点位置。根据建立模型,可以计算光线变化角度 $\Delta\beta_{ci} = \beta_{ci} - \beta_{c0}$,即可得到星敏感器测量角度误差 $\Delta\beta_{ci} - \Delta\beta_{ri}$ 。

$$\begin{cases} l_{O'B'} = \frac{f + \Delta f + \Delta s \Delta \tan \theta}{\sin(180^\circ - 90^\circ - \theta - \beta_{ri})} \sin \beta_{ri} + \Delta x + \Delta d \\ l_{OB} = l_{O'B'} = l_{O'B'} - l_{OO'} = \frac{f + \Delta f + \Delta s \Delta \tan \theta}{\cos(\theta + \beta_{ri})} \sin \beta_{ri} + \frac{\Delta s}{\cos \theta} + \Delta x + \Delta d \end{cases}, \quad (10)$$

可以得到

$$\beta_{ci} = \arctan\left(\frac{l_{OB}}{f}\right), \quad (11)$$

则测量角度误差可以表示为

$$\arctan\left[\frac{f + \Delta f + \Delta s \Delta \tan \theta}{\cos(\theta + \beta_{ri})} \sin \beta_{ri} + \frac{\Delta s}{\cos \theta} + \Delta x + \Delta d\right] - \arctan\left(\frac{\Delta s}{f \cos \theta}\right) - \beta_{ri}, \quad (12)$$

式中设定实际真实光轴向正方向偏移时, Δs 为正; Δf 沿 e_3 轴正方向为正; θ 顺时针方向为正; Δx 沿正方向为正; Δd 沿正方向为正。误差传播模型已建立。

4 星敏感器精度误差分析与仿真

对各个误差影响分量采用了蒙特卡罗随机模拟法和最大误差法两种方法对比讨论。在蒙特卡罗随机模拟法中,假设以下误差分量如星点提取、倾斜角、焦距和主点等经过标定以后都是随机误差,根据概率和统计的研究结果表明,可以将这些误差视为符合正态分布、期望值 u 为 0、方差 σ 未知的随机误差。另外,由于在星空中能被捕获的星点有两万多个,数量大,且照射方向未知,所以可以将星点入

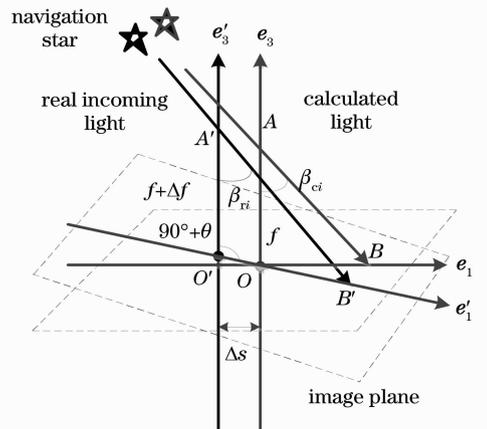


图 8 完整误差传播示意图

Fig. 8 Sketch of complete error propagation

射角度认为是在视场内的均匀分布。基于这两个统计假设,可以很好地结合星敏感器的几何模型和蒙特卡罗随机模型,给出完整的随机误差影响分析的结果。使用了最大误差的方法验证蒙特卡罗仿真结果,该方法可以直观地看出误差大小关于不同入射角的分布情况,分析得到最大误差点的位置,从而为后续研究带来帮助。

分析的对象为课题组研制的 7" 星敏感器,采用 APS CMOS 图像传感器,传感器像素为 1024 pixel × 1024 pixel,每个像素尺寸为 0.015 mm;视场角为 17° 圆视场,焦距为 49.7433 mm(3316.22 pixel)。

表 1 蒙特卡罗随机模拟方法单一误差因素影响分析

Table 1 Single error factor analysis with Monte Carlo stochastic simulation

Item	Distribution of factors (Gaussian distribution)		Distribution of angle measurement error	
	μ /pixel	σ /pixel	μ /(")	σ /(")
Star point extraction error	0	0.1/3	0.0065	2.0354
Principle point deviation	0	4.5/3	-0.0138	2.0410
Focal length deviation	0	0.6/3	0.0011	1.8158
Inclination error of image plane	0	0.075/3	0.0033	1.9681
Distortion (residual error after the calibration)	0	0.1/3	0.0061	2.0282

4.1.2 蒙特卡罗方法综合因素影响分析

在各误差影响因素满足表 1 中分布规律时,测量角度误差符合 $\mu = -0.0160''$, $\sigma = 4.4062''$ 分布规律,即 $\mu - 3\sigma \sim \mu + 3\sigma = -13.2346'' \sim 13.2027''$ (单星)。星敏感器工作状态下像面内至少有 4 颗星,则星敏感器测量精度^[16]符合 $-\frac{13.2346}{\sqrt{4}} \sim \frac{13.2027}{\sqrt{4}}$, 即 $-6.6173'' \sim 6.6013''$, 如图 9 所示,满足 7" 星敏感器要求。

将(12)式中的 $\Delta x, \Delta s, \Delta f, \theta$ 等偏差值的 3 个设为 0,保留其中一个时,可以退化到 4.1.1 节中的单

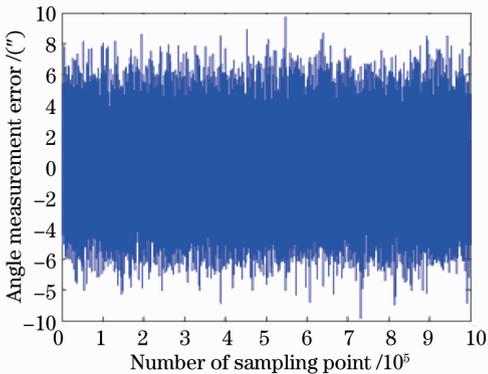


图 9 蒙特卡罗综合影响分析结果

Fig. 9 Synthetic analysis result with Monte Carlo stochastic simulation

4.1 蒙特卡罗方法误差影响分析

蒙特卡罗方法^[15]是利用随机数的统计规律来进行计算和模拟的方法。以下分别利用蒙特卡罗方法对单一因素和综合因素进行分析,通过 100000 次模拟,得到星敏感器各误差对系统精度的统计影响结果。

4.1.1 蒙特卡罗方法单一因素影响分析

表 1 数据采用蒙特卡罗随机模拟方法,仿真分析亚像元提取误差、主点偏差、焦距偏差、像面倾斜、畸变等各因素对星敏感器测量角度误差影响。

一误差分析结果。从而可以验证说明(12)式的数学模型的正确性。通过对星敏感器误差传播模型和蒙特卡罗随机分析,可以得到以下结论:对于待分析系统来说,在亚像元提取误差(与畸变因素结合)、主点、焦距、像面倾斜和相对畸变量分别控制在 0.1 pixel、4.5 pixel、0.6 pixel、0.075° 和万分之二以内时,带来的测量角度误差在同一量级上,考虑综合作用后仍可以保证 7" 星敏感器的测量精度指标。

4.2 最大误差方法仿真

根据 3.2 节中星敏感器误差传播模型和待分析的 7" 星敏感器样机参数以及 4.1 节中初步分析获得的亚像元提取误差、主点偏差、焦距偏差和像面倾斜等因素的变化范围限制条件,对 3.2 节的模型及 4.1 节的蒙特卡罗分析方法进行验证,其中入射角度 β_i 变化范围为 $0^\circ \sim 8.5^\circ$, 焦距 f 取 49.7433 mm(3316.22 pixel)。

4.2.1 星点提取误差对星敏感器单星定位精度影响

在星点提取误差 Δx 在 0.1 pixel 或 -0.1 pixel 的仿真条件下,星点提取误差对星敏感器精度的影响随入射角变化关系如图 10 所示。

4.2.2 主点变化对星敏感器单星定位精度影响

在主点变化范围满足 $-4.5 \sim 4.5$ pixel 的仿真条件下,主点变化对星敏感器精度的影响随入射角变化关系如图 11 所示。

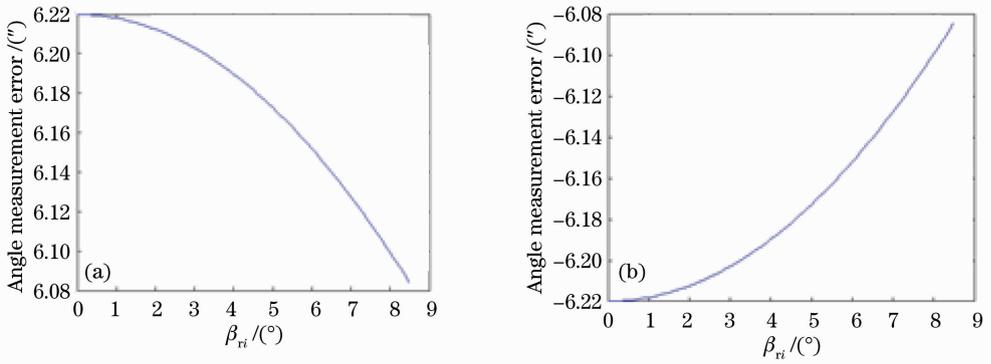


图 10 星点坐标误差对星敏传感器精度影响。(a) $\Delta x=0.1$ pixel; (b) $\Delta x=-0.1$ pixel

Fig. 10 Influence of star position error on star sensor accuracy. (a) $\Delta x=0.1$ pixel; (b) $\Delta x=-0.1$ pixel

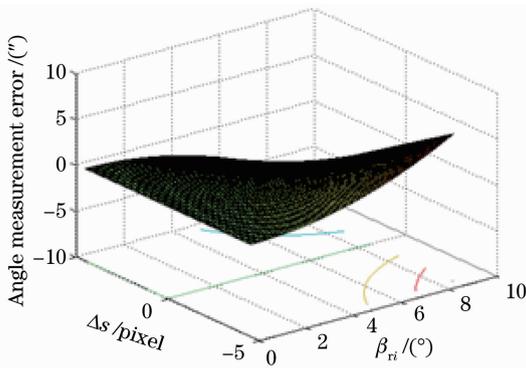


图 11 主点误差对星敏传感器精度影响

Fig. 11 Influence of principle-point error on star sensor accuracy

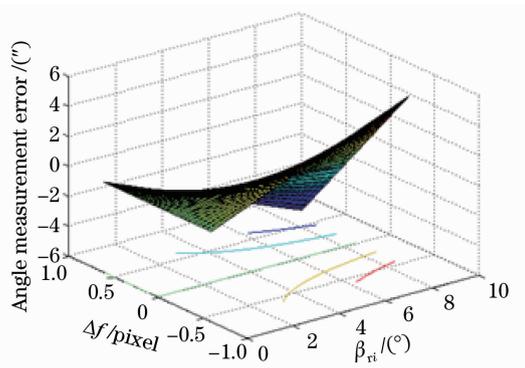


图 12 焦距误差对星敏传感器精度影响

Fig. 12 Influence of focal length error on star sensor accuracy

4.2.3 焦距变化对星敏传感器单星定位精度影响

在焦距变化满足 $-0.6 \sim 0.6$ pixel 的仿真条件下,焦距变化对星敏传感器精度的影响随入射角变化关系如图 12 所示。

4.2.4 像面倾斜对星敏传感器单星定位精度影响

在像面倾斜角满足 $0^\circ \sim 0.075^\circ$ 或 $0^\circ \sim -0.075^\circ$ 的仿真条件下,像面倾斜对星敏传感器精度的影响随入射角变化关系如图 13 所示。

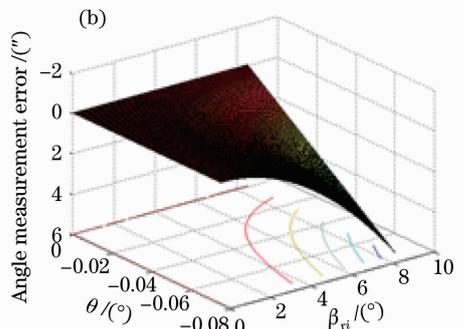
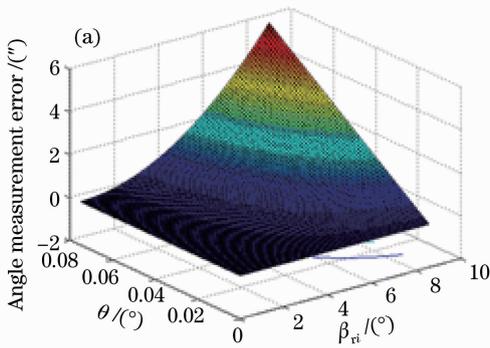


图 13 倾斜角误差对星敏传感器精度影响。(a) $0^\circ \leq \theta \leq 0.075^\circ$; (b) $-0.075^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$

Fig. 13 Influence of incline angle error on star sensor accuracy. (a) $0^\circ \leq \theta \leq 0.075^\circ$; (b) $-0.075^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$

4.2.5 畸变对星敏传感器单星定位精度影响

在畸变量满足 0.09 pixel (相对畸变量约为万分之二) 和 0.4956 pixel (相对畸变量约为千分之

一) 的仿真条件下,畸变对星敏传感器精度的影响随入射角变化关系如图 14 所示。

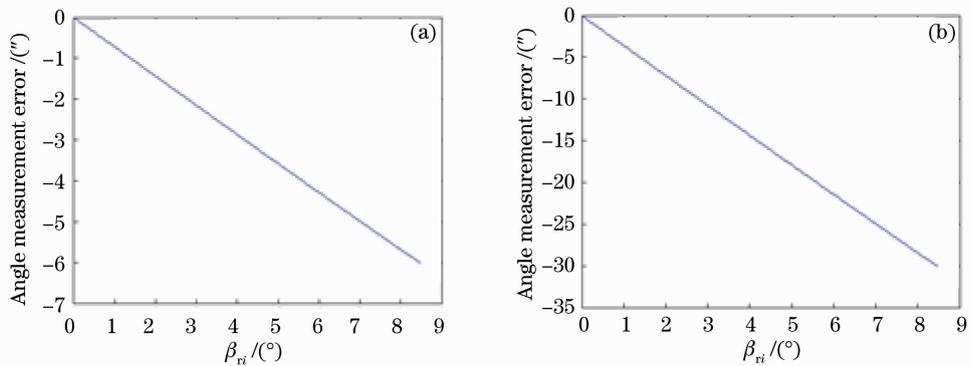


图 14 畸变对星传感器精度影响。(a) $\Delta d=0.09$ pixel; $\Delta d=0.4956$ pixel

Fig. 14 Influence of distortion on star sensor accuracy. (a) $\Delta d=0.09$ pixel; $\Delta d=0.4956$ pixel

由仿真结果可见,最大误差方法分析得到亚像元提取误差、主点偏差、焦距偏差和像面倾斜等因素的影响结果与蒙特卡罗方法分析的结果一致,验证所提出的光学系统误差传播模型合理可信。同时可以看到对于现有星传感器光学系统来说,若需保证亚像元提取误差水平,主点、焦距的偏差在误差范围内,像面倾斜角和畸变这两项因素是需要重点标定的对象,经过后续标定实验可使畸变在万分之二以内,进一步通过星传感器精度测量方法^[17]得到星传感器的真实性能可以满足 7"设计精度。

6 结 论

星传感器光学系统误差分析方法可对影响星传感器精度的若干因素(星点提取误差、主点位置偏差、焦距偏差、像面倾斜和畸变)进行权重分析;得到星传感器误差传播模型;根据星传感器精度指标,对光学参数误差提出要求。以此为依据,可以进一步进行实验室标定,通过仿真验证提出的分析方法合理,模型正确。

该系统误差分析方法可以主要应用在以下方面:1)作为标定目标的参考依据,即若标定后系统同时满足以上 5 个指标,表明标定结果满足要求,经标定后的星传感器精度可满足设计要求;2)根据系统本身具备的精度指标判断系统所能达到的最高精度;3)判断目前系统中何种因素起主要的误差作用,从而判断后续标定实验的重点。

对于应用 1)来说,由于标定方法的限制,一般情况下,无法对各误差影响因素进行独立明确的测量,所以很难判断各误差影响因素是否全部满足以上 5 个判定指标,多用于设计中指标的确定和论证。由 3)可判断出若干误差范围限制条件中某些条件非常容易满足,如主点位置误差;而另外一些比较难

以满足,需要经过精心的标定以及考虑与其他参数的关系才能达到要求,例如倾斜角度和畸变等,所以标定的重点与系统的参数相关,可以针对标定重点和系统特点设计标定实验和标定流程,最终使标定后的星传感器的测量角度误差在设计范围内。

参 考 文 献

- 1 C. C. Liebe. Accuracy performance of star tracker—a tutorial [J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 587~599
- 2 Wang Hongtao, Luo Changzhou, Wang Yu *et al.*. Star sensor model parametric analysis and calibration method study [J]. *J. University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, **39**(6): 880~885
王洪涛, 罗长洲, 王 渝 等. 星传感器模型参数分析及标准方法研究[J]. *电子科技大学学报*, 2010, **39**(6): 880~885
- 3 Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1343~1348
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
- 4 A. Ryberg, B. Lennartson, A. K. Christiansson *et al.*. Analysis and evaluation of a general camera model [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2011, **115**(11): 1503~1515
- 5 He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao *et al.*. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1023001
贺鹏举, 梁 斌, 张 涛 等. 大视场星传感器标定技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1023001
- 6 Xing Fei. Micro APS CMOS Star Tracker and Its Key Techniques Research [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006
邢 飞. 微小型 APS CMOS 星传感器及其关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2006
- 7 G. Wahba. A least squares estimate of satellite attitude [J]. *SIAM Review*, 1966, **8**(3): 384~386
- 8 Li Jie. Study on Key Technique of APS Star Sensor [D]. Jilin: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005
李 杰. APS 星传感器关键技术的研究[D]. 吉林: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- 9 Haiibo Liu, Xiujian Li, Jichun Tan *et al.*. Novel approach for laboratory calibration of star tracker [J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(7): 073601
- 10 C. C. Liebe. Star trackers for attitude determination [J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1995, **10**(6): 10~16
- 11 Wang Haiyong, Zhou Wenrui, Lin Haoyu *et al.*. Parameter

- estimation of Gaussian gray diffusion model of static image spot [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0323004
王海涌, 周文睿, 林浩宇等. 静态像点高斯灰度扩散模型参数估计方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0323004
- 12 Xing Fei, Dong Ying, Wu Yanpeng *et al.*. Star tracker parametric analysis for autonomous calibration [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, **45** (11): 1484~1488
邢 飞, 董 瑛, 武延鹏等. 星敏传感器参数分析与自主校正[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, **45**(11): 1484~1488
- 13 A. B. Kataké. Modeling, Image Processing and Attitude Estimation of High Speed Star Sensors[D]. Texas: Texas A&M University, 2006
- 14 Fei Xing, Ying Dong, Zheng You. Laboratory calibration of star tracker with brightness independent star identification strategy [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(6): 063604
- 15 J. P. Roth. Diagnosis of automata failures; a calculus and a method [J]. *IBM J. Research & Development*, 1966, **10**(7): 278~291
- 16 Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122001
范巧云, 李小娟. 全天时星敏传感器光学系统设计参数选择[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122001
- 17 Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Accuracy measurement of star trackers based on astronomy [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, **52**(4): 430~435
孙 婷, 邢 飞, 尤 政. 一种基于天体运动学的星敏传感器精度测量方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, **52**(4): 430~435

栏目编辑: 王晓球