

星敏感器星点定位系统误差补偿

姜 亮^{1,2} 张立国¹ 张星祥¹ 任建岳¹

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过星点定位系统误差频域分析,寻找不同的点扩展函数下星点定位系统误差分布理论表达式形式上的共性。根据光学系统不同视场(FOV)的点扩展函数数据,运用蒙特卡罗法对星点定位系统误差分布进行了仿真,仿真结果与频域分析结果相符。在实验中测量了弥散斑尺寸为5 pixel×5 pixel的星点目标的星点定位系统误差,采用误差补偿方程组对星点定位系统误差进行了补偿。补偿后中心视场星点定位精度提高了66.56%,边缘视场星点定位精度提高了57.21%,而传统正弦曲线拟合补偿方法仅使定位精度提高35.7%,提出的误差补偿方法效果总体上优于传统正弦拟合补偿方法。

关键词 成像系统; 传感器; 星点定位系统误差; 频域分析; 系统误差补偿

中图分类号 V249.32

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0314001

Compensation for Star Centroid Systematic Error of Star Trackers

Jiang Liang^{1,2} Zhang Ligu¹ Zhang Xingxiang¹ Ren Jianyue¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

ChangChun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The frequency of star centroid systematic error is analyzed, the common quality of star centroid systematic error distributions with different point spread functions is found. A simulation using Monte Carlo method is done according to the point spread function data of different field of views (FOV) from optical system. The result of simulation is in accordance with frequency analysis. The star centroid systematic error of the star object whose dispersion spot dimensions are 5 pixel×5pixel is experimentally measured. The star centroid systematic error is compensated with error compensation equations, after compensation the accuracy of central FOV is increased by 66.56%, and the accuracy of fringe FOV is increased by 57.21%. So the effect of the compensation using the proposed method is better than the traditional compensation method using sine curve fitting with the accuracy only increased by 35.7%.

Key words imaging systems; sensors; star centroid systematic error; frequency analysis; compensation for systematic error

OCIS codes 280.4788; 100.2960; 070.2465

1 引 言

星敏感器作为一种高精度姿态测量传感器广泛应用于航空航天领域,其姿态测量精度可达角秒量级,远高于传统的姿态测量设备。随着卫星技术的发展,对星敏感器姿态测量精度的要求也在不断提高,提高

收稿日期: 2014-08-05; 收到修改稿日期: 2014-09-30

基金项目: 国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 姜 亮(1985—),男,博士研究生,主要从事星敏感器相关算法方面的研究。E-mail: jkl85527@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 任建岳(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学及光机电系统等方面的研究。

E-mail: renjy@ciomp.ac.cn

星敏感器的姿态测量精度成为了一个亟待解决的问题。

星点定位系统误差是定位误差的重要组成部分,对它进行补偿是提高星敏感器精度的重要途径。传统方法采用高斯点扩展函数(PSF)模型对星点定位系统误差进行了频域分析^[1],根据频域分析得到的系统误差理论解析式对星点定位系统误差进行正弦拟合补偿。但由于高斯点扩展函数模型与光学系统真实的点扩展函数存在很大差异,采用高斯点扩展函数模型的频域分析结果与真实情况也存在较大的偏差,基于这种频域分析结果所进行的正弦曲线拟合补偿效果也不够理想。

本文在星点定位系统误差频域分析过程中,寻找不同点扩展函数作用下系统误差分布形式上的共性。根据星敏感器光学系统的91个不同视场(FOV)的点扩展函数数据,对星点定位系统误差进行了仿真。在实验中对弥散斑尺寸为5 pixel×5 pixel大小的星点目标进行了定位系统误差测定与补偿,验证了所提出的补偿方法对星点定位系统误差的补偿效果。

2 星点定位算法原理与误差来源

2.1 星点定位算法

星点定位算法主要包括:质心法,灰度平方加权质心法,高斯曲面拟合法等。其中质心法计算过程简便,并且稳健性好,得到了广泛的应用,本文的分析讨论均是针对质心法。质心法星点坐标计算公式如下^[2-3]:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i}, \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i}, \quad (2)$$

式中 (x_i, y_i) 是组成该星点弥散斑的第 i 个像元对应坐标, g_i 是该像元对应的灰度值。 (x, y) 是算法计算所得坐标。星点坐标定位质心算法的频域对应形式如下^[2,4-6]:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} = \frac{\iint x \cdot g(x, y) dx dy}{\iint g(x, y) dx dy} = \frac{G'_u(0, 0)}{-j2\pi G(0, 0)} \quad (3)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} = \frac{\iint y \cdot g(x, y) dx dy}{\iint g(x, y) dx dy} = \frac{G'_v(0, 0)}{-j2\pi G(0, 0)}. \quad (4)$$

2.2 误差来源

星点定位误差包括随机误差和系统误差两部分。随机误差来源于成像过程中产生的各种噪声,如暗电流噪声、散粒噪声等,这些随机噪声很难在后期进行补偿,一般在设计图像采集电路时采取针对性的措施,以尽量提高信噪比。在星图预处理过程中,可采用滤波算法和阈值法^[5]将星点信号与背景噪声分离,进一步提高信噪比。

星点定位系统误差是由图像传感器采样过程引入,在星图处理过程中产生的误差,本质上是星点定位算法中采用像元几何中心坐标代替像元内真实能量中心坐标进行计算而引入的误差^[5]。星点定位系统误差的量级一般在0.1 pixel左右,并且它的分布呈现以像元为周期的规律性变化,因此找到它的变化规律就可以有效地补偿。

影响星点定位系统误差的因素主要包括:

1) 星敏感器光学系统点扩展函数对星点定位系统误差的分布存在不可忽略的影响,点扩展函数形态的改变会使星点定位系统误差分布形态和幅度发生变化。频域分析中应当避免采用特定的点扩展函数模型,这样会造成分析结果与实际的偏离。

2) 在星图去噪过程中,有可能会损失一部分有效信号,这会造成系统误差的增大,影响的程度视噪声水平而定,与设定的阈值大小有关。

3) 当星点目标亮度比较大时,该目标的图像可能会出现饱和截断^[1]情况,导致星点定位误差的增大,可以通过选择动态范围大的图像传感器来避免。

3 星点定位系统误差频域分析

3.1 传统频域分析

高斯点扩展函数模型与真实的星敏感器光学系统的点扩展函数存在较大的差异。并且星敏感器光学系统的点扩展函数从中心视场到边缘视场存在一个参数逐渐变化的过程,而高斯点扩展函数模型是一种参数固定的点扩展函数模型,在全视场内不变。这两点不足导致采用高斯点扩展函数模型的频域分析存在缺陷。

图 1(a)~(d)分别为离焦量为 110 μm 的星敏感器光学系统在 0° 、 4° 、 8° 、 10.5° 视场的点扩展函数。



图 1 不同视场下星敏感器镜头的 PSF

Fig.1 PSF of star tracker under different FOV

传统星点定位系统误差频域分析中采用的高斯点扩展函数模型解析式^[6-10]为

$$i(x,y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{[(x-x_0)]^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (5)$$

图 2 为高斯点扩展函数模型示意图。比较图(2)与图 1(a)~(d)可见,高斯点扩展函数模型与星敏感器光学系统的点扩展函数差异较大,采用高斯点扩展函数模型对星点定位系统误差进行频域分析,其结果与真实情况也会存在很大的偏差。将频域分析的结果,直接用来指导星点定位系统误差的补偿,就限制了系统误差的补偿效果。还有学者将星敏感器点扩展函数取为 Pill Box 型^[4],但这些点扩展函数模型都与光学系统真实点扩展函数存在较大偏差,其对应的频域分析结果与真实情况也存在较大偏离。随后进行的星点定位系统误差频域分析,不采用特定的点扩展函数模型,这样通过频域分析可以找到不同点扩展函数作用下,系统误差分布规律的共性。

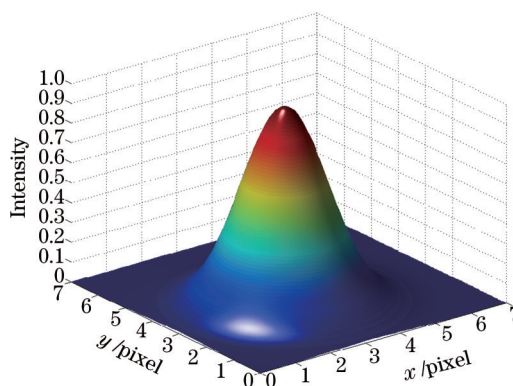


图 2 高斯点扩展函数模型

Fig.2 Model of Gaussian PSF

3.2 频域分析

3.2.1 星点采样过程

图 3 为简化星点采样过程,不考虑采样窗口对采样结果的影响。采样过程对应表达式

$$g(x,y) = i(x,y) \otimes p(x,y) \times s(x,y), \quad (6)$$

式中 $i(x,y)$ 是光学系统点扩展函数,与星敏感器的光学系统有关^[11-15], $p(x,y)$ 是图像传感器的像元响应函数,它与图像传感器的填充因子以及光敏区在像元中的相对位置有关, $s(x,y)$ 是梳状采样函数,与图像传感器采样间隔对应。

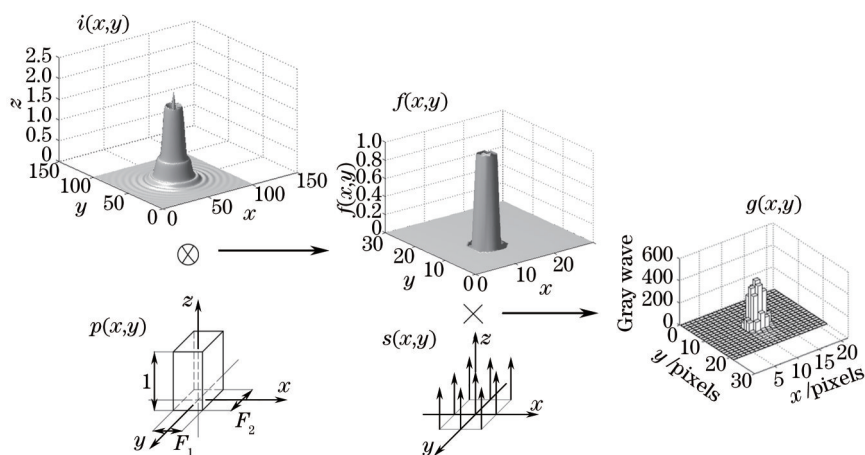


图3 星点采样模型

Fig.3 Model of star spot sampling

图像传感器的填充因子一般小于100%,像元响应函数会随着像元光敏区的形状改变而改变。如果图像传感器没有采用微透镜技术,那么对应的像元响应函数 $p(x,y)$ 近似由光敏区的形状决定。在像元光敏区内各区域灵敏度相同的条件下,对应的像元响应函数为像元光敏区内的均匀分布。为便于分析,假设像元响应函数在光敏区域内幅值取为1, F_1 为横向填充因子, F_2 为纵向填充因子,分别表示光敏区在横向和纵向两个方向上占据像元宽度的比例,如图4所示。

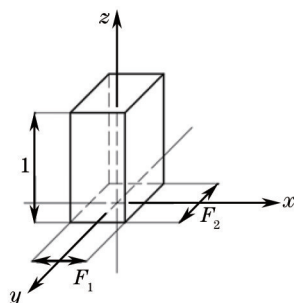


图4 像元响应函数

Fig.4 Pixel response function

面向星敏感器应用的APSCMOS传感器STAR1000像元结构如图5所示,其像元光敏区为正方形,横向、纵向填充因子 $F_1 = F_2 = W_a/L_a$, 其中 L_a 为像元宽度, W_a 为光敏区宽度。频域分析中建立坐标系如图6所示,(0,0) 点位于互补金属氧化物半导体(CMOS)器件左上角像元的光敏区中心。

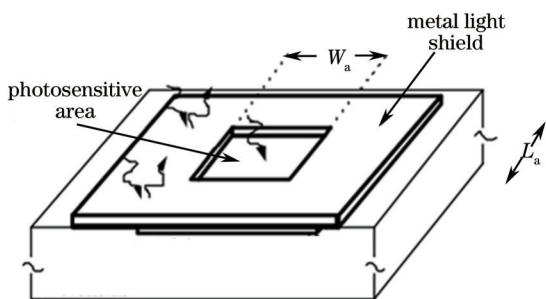


图5 STAR1000 像元结构图

Fig.5 Structure of STAR1000 pixel

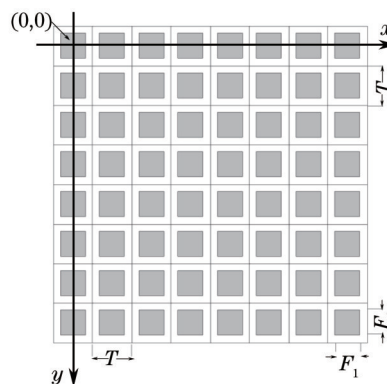


图6 像平面坐标系

Fig.6 Coordinate system of image plane

(6)式在空间频域对应:

$$G(u,v) = I(u,v) \cdot P(u,v) \otimes S(u,v). \quad (7)$$

将像元响应函数^[1]假定为像元光敏区的均匀分布,其频域表达式为

$$P(u,v) = F_1 F_2 \frac{\sin(\pi u F_1)}{\pi u F_1} \frac{\sin(\pi v F_2)}{\pi v F_2}. \quad (8)$$

采样函数为二维梳状函数,其频域表达式为

$$S(u,v) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(u-m)\delta(v-n). \quad (9)$$

文中频域分析针对质心法进行,可将(8)、(9)式代入(7)式得:

$$G(u,v) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} I \cdot \frac{\sin[\pi(u-m)F_1]}{\pi(u-m)F_1} \frac{\sin[\pi(v-n)F_2]}{\pi(v-n)F_2} \cdot \exp\{-j2\pi[(u-m)x_0 + (v-n)y_0]\}. \quad (10)$$

把(10)式代入(3)式得:

$$x = \frac{G'_u(0,0)}{-j2\pi G(0,0)} = x_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} a_1 \cdot \sin 2\pi m x + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} a_2 \cdot \sin 2\pi m x \cos 2\pi n y. \quad (11)$$

星点横坐标系统误差:

$$\delta_x = x - x_0 = \sum_{m=1}^{+\infty} a_1 \cdot \sin 2\pi m x_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} a_2 \cdot \sin 2\pi m x_0 \cos 2\pi n y_0, \quad (12)$$

式中 a_1 与 a_2 为系数:

$$\begin{cases} a_1 = \left[I'_u(m,0) \cdot F_2 \cdot \frac{\sin \pi m F_1}{\pi m} - I(m,0) \cdot F_2 \cdot \frac{\sin \pi m F_1 - \pi F_1 m \cos \pi m F_1}{\pi m^2} \right] / [\pi G(0,0)] \\ a_2 = \left[2I(m,n) \cdot \frac{\sin \pi n F_2}{\pi n} \cdot \frac{\sin \pi m F_1 - \pi F_1 m \cos \pi m F_1}{\pi m^2} - 2I'_u(m,n) \cdot \frac{\sin \pi m F_1}{\pi m} \cdot \frac{\sin \pi n F_2}{\pi n} \right] / [\pi G(0,0)] \end{cases}. \quad (13)$$

图像传感器选定后, F_1 、 F_2 也是常数系数, a_1 、 a_2 只与点扩展函数有关,当点扩展函数 $i(x,y)$ 改变时, a_1 、 a_2 发生改变,星点定位系统误差分布也发生变化。

传统频域分析中,采用了高斯点扩展函数模型,推得星点横坐标系统误差解析式为^[1]

$$\delta_x = x - x_0 = A \sin 2\pi m x_0. \quad (14)$$

可见两种频域分析的结果形式上存在较大的差异,传统频域分析结果缺少第二项,为了验证文中频域分析结果,进行了数值仿真。

4 仿真与实验

4.1 星点定位误差仿真

根据星敏感器镜头 91 个不同视场的点扩展函数数据,用蒙特卡罗法对星点坐标误差进行了仿真,横坐标与纵坐标范围均为 0~1023,光轴对应坐标(511.5,511.5),单位为 pixel,仿真条件如下:

1) 分别对不加噪声条件下、加均值为 $\overline{x_{\text{noise}}}=3$, 标准差为 $\sigma_{\text{noise}}=0.2$ 的高斯白噪声条件下和加均值为 $\overline{x_{\text{noise}}}=3$, 标准差为 $\sigma_{\text{noise}}=5$ 的高斯白噪声条件下的星点定位误差进行仿真。后两种加高斯白噪声条件下的仿真中,分别设定灰度阈值为 $V_{\text{th}} = \overline{x_{\text{noise}}} + 5\sigma_{\text{noise}} = 4$ 和 $V_{\text{th}} = \overline{x_{\text{noise}}} + 5\sigma_{\text{noise}} = 28$ (数值均为灰度值);

2) 点扩展函数数据采用由 Code V 导出的从 $0^\circ \sim 10.5^\circ$ 视场的 91 个视场的点扩展函数,星点弥散斑直径为 5 pixel;

3) 假设像元光敏区的 x 轴宽度为 0.8 pixel, y 轴宽度为 0.8 pixel,即填充因子为 0.64,光敏区位于像元的中心;

4) 像元尺寸^[16]为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,并将 $15 \mu\text{m}$ 设为一个单位长度;

5) 建立坐标系如图 6 所示,原点设在 CMOS 左上角像元的光敏区的中心;

6) 将仿真步长^[4]设为 0.05 pixel,即将星点弥散斑中心 (x_0, y_0) 每次沿一个坐标轴移动 0.05 pixel。

首先,对横坐标范围为 512~515 pixel,纵坐标范围为 512~515 pixel 的中心视场区域的星点定位系统误差

进行仿真。此区域内,无噪声条件下星点横坐标误差分布如图7所示,在 $\sigma_{noise}=0.2$ 和 $\sigma_{noise}=5$ 两种噪声水平下的星点横坐标误差分布分别如图8、9所示。

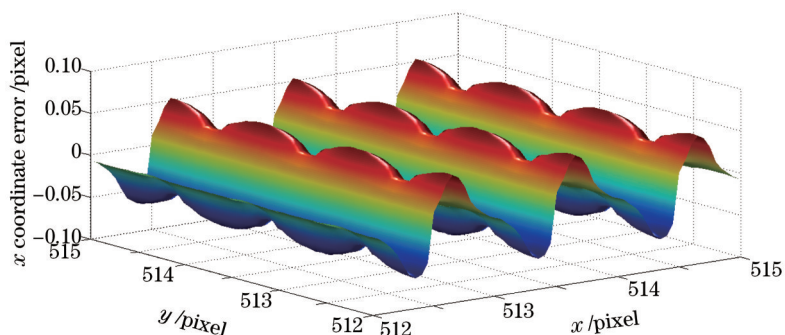


图7 不加噪声时中心视场横坐标误差分布

Fig.7 Distribution of x coordinate error for the center of FOV without noise

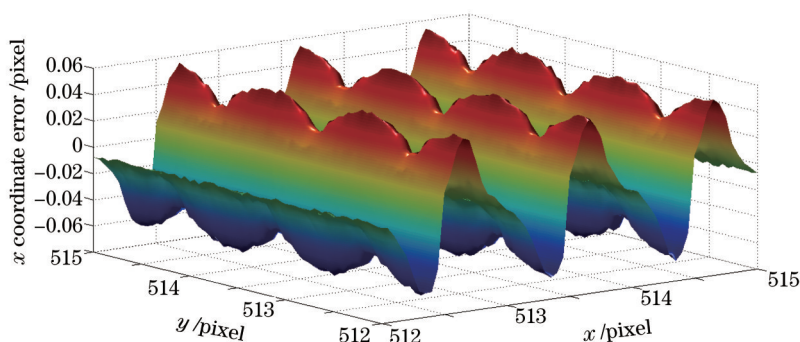


图8 $\sigma_{noise}=0.2$ 时中心视场横坐标误差分布

Fig.8 Distribution of x coordinate error for the center of FOV when $\sigma_{noise}=0.2$

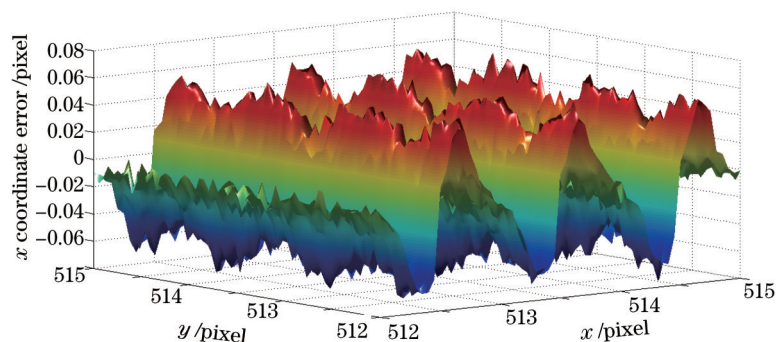


图9 $\sigma_{noise}=5$ 时中心视场横坐标误差分布

Fig.9 Distribution of x coordinate error for the center of FOV when $\sigma_{noise}=5$

然后,对横坐标范围为512~515 pixel,纵坐标范围为700~703 pixel的4°视场的星点定位系统误差进行仿真。此区域内,无噪声条件下星点横坐标误差分布如图10所示,在 $\sigma_{noise}=0.2$ 和 $\sigma_{noise}=5$ 两种噪声水平下的星点横坐标误差分布分别如图11、12所示。

对比中心视场和4°视场两个视场的仿真结果可见,星点定位系统误差的分布随点扩展函数形态的改变而逐渐改变。边缘视场误差峰值为0.06 pixel,谷值为-0.04 pixel,中心视场误差峰值为0.06 pixel,谷值为-0.06 pixel。4°视场峰值与谷值的不对称,这是由于该视场的点扩展函数的不对称造成的。

对比无噪声条件下与 $\sigma_{noise}=0.2$ 、 $\sigma_{noise}=5$ 的两种噪声水平下星点定位系统误差分布可见,随着高斯白噪声的加入使星点定位系统误差分布略有变化,仿真结果与频域分析的结果是相符的。

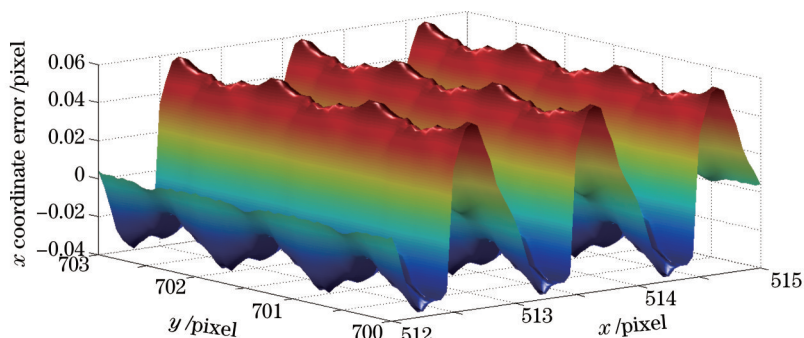


图 10 不加噪声时 4°视场横坐标误差仿真分布

Fig.10 Distribution of x coordinate error for the 4° FOV without noise

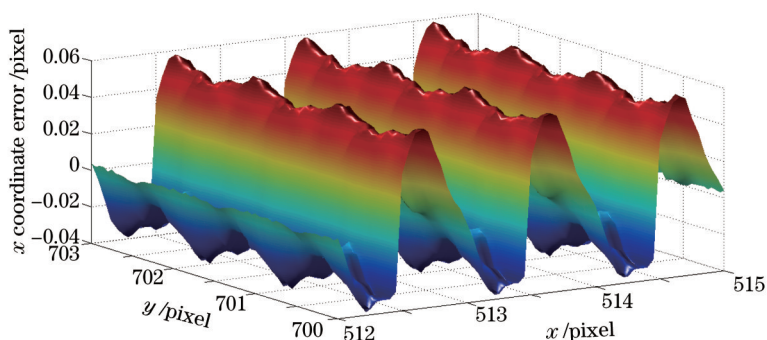


图 11 $\sigma_{\text{noise}}=0.2$ 时 4°视场横坐标误差仿真分布

Fig.11 Distribution of x coordinate error for the 4° FOV when $\sigma_{\text{noise}}=0.2$

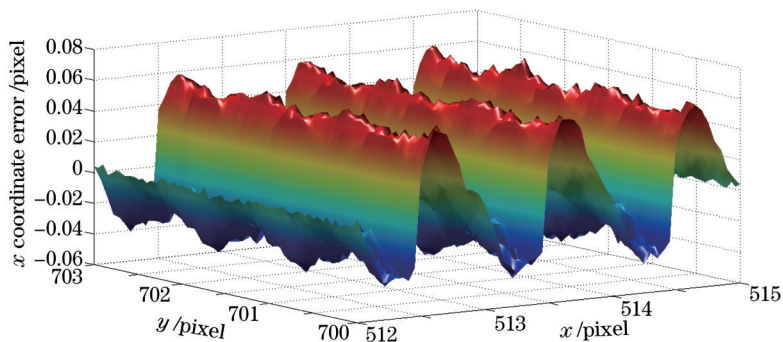


图 12 $\sigma_{\text{noise}}=5$ 时 4°视场横坐标误差仿真分布

Fig.12 Distribution of x coordinate error for the 4° FOV when $\sigma_{\text{noise}}=5$

从仿真结果看,星点横坐标系统误差 δ_x 沿 x 轴呈 S 曲线^[1]变化,周期为 1 pixel, S 曲线幅值沿 y 轴呈类余弦曲线变化,这是由于 $a_2 \sin 2\pi m x_0 \cos 2\pi n y_0$ 对幅值的调制作用。传统方法采用高斯点扩展函数进行频域分析,分析结果为 S 曲线幅值在像平面内不发生改变^[1],无法解释仿真中 S 曲线幅值改变的现象。传统方法中的频域分析与仿真都是假设点扩展函数为高斯型的条件下进行的,这造成了与实际情况存在偏离。仿真中应当针对具体的光学系统进行,采用特定的点扩展函数模型导致传统方法存在不足,使误差补偿效果不够理想。

4.2 误差测量与补偿

频域分析中推导出了星点系统误差的理论解析式,该式含有无穷项级数,不便于星点定位系统误差的补偿,需要将其近似才可用于实验中系统误差的补偿。考虑在星敏感器图像处理嵌入式系统中,硬件的运算能力是有限的,在保证实时性的前提下,也必须将解析式进行合理的近似,才有实际意义。

根据(11)式星点误差解析式,将无穷级数取前 2 项近似,可以得到补偿方程组:

$$\begin{cases} x = x_0 + a_1 \sin 2\pi x_0 + a_2 \sin 2\pi x_0 \cos 2\pi y_0 \\ y = y_0 + a_1 \sin 2\pi y_0 + a_2 \cos 2\pi x_0 \sin 2\pi y_0 \end{cases} \quad (15)$$

式中系数 a_1 、 a_2 需要根据实验数据拟合确定。

星点定位系统误差测试系统由卤钨灯、积分球、平行光管^[17]、高精度三轴平移台(各轴精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$)、稳定平台构成,图13为实验装置实物图。星敏感器图像传感器部分固定于高精度三轴平移台上,星敏感器光学系统与CMOS探测器分离。平移台移动,使弥散斑在图像传感器阵列表面产生相对位移。平移台 x 轴 y 轴分别对应CMOS探测器 x 轴、 y 轴。星点弥散斑能量分布不变,仅星点像在CMOS探测器上的位置改变。实验中使用的星敏感器CMOS型号为STAR1000,像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,填充因子约0.8。

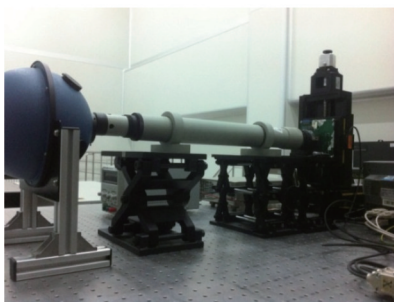


图13 星点定位误差测量设备

Fig.13 Equipment for star centroid error measurement

图14为实验装置示意图,图中标示了高精度三轴平移台三轴的方向。星敏感器图像传感器部分固定于平台的连接板上, z 轴可调节图像传感器的离焦量, x 轴、 y 轴分别对应图像传感器的 x 轴、 y 轴。当平台沿 x 轴、 y 轴移动时,星点弥散斑与图像传感器产生对应轴向上的相对位移。

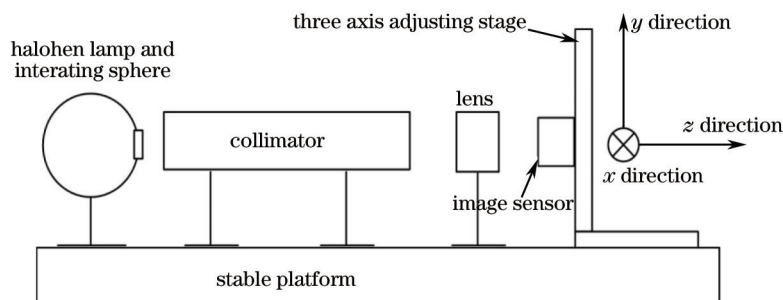


图14 星点定位误差测量设备示意图

Fig.14 Schematic diagram of the equipment for star centroid error measurement

首先调节平行光管与星敏镜头光轴平行,在中心视场成像,随机选取一个位置记录为起始位置,使平移台沿 x 轴方向移动,以 $1 \mu\text{m}$ 为间隔($1/15 \text{ pixel}$),在每个位置拍摄一幅星点像,平移 5 pixel 的距离,即 $75 \mu\text{m}$,共拍摄76幅星点像,星点像如图15所示。由于光斑的真实位置难以测量,只能通过测增量的方法,间接地测量系统误差,测量结果与拟合曲线如图16所示。

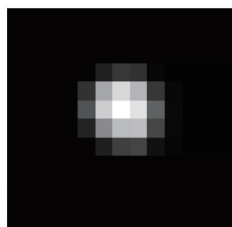


图15 单星星点像

Fig.15 Single star image

这 76 幅星点图内星点的纵坐标算法计算值 y 呈类正弦变化规律, 周期为一个像元宽度, 这与频域分析及仿真结果相符。理论解析式纵坐标计算值 $y = y_0 + a_1 \sin 2\pi m y_0 + a_2 \sin 2\pi m y_0 \cos 2\pi n x_0$ 中第二项中含有 $\sin 2\pi m y_0 \cos 2\pi n x_0$, 使 y_0 不变时, y 随 x_0 呈余弦变化, 如图 17 所示。进一步验证了采用频域分析的合理性。

如图 16、17 所示, 基于最小二乘法拟合, 拟合后可得 $a_1 = -0.06 \text{ pixel}$, $a_2 = -0.018 \text{ pixel}$ 。正弦曲线初始相位为 0.58, 它是根据误差补偿后残差最小为标准在 $0 \sim 2\pi$ 范围内优化得到。于是得到具体的误差补偿方程组为

$$\begin{cases} x = x_0 - 0.06 \sin(2\pi x_0 + 0.58) - 0.018 \sin(2\pi x_0 + 0.58) \cos 2\pi y_0 \\ y = y_0 - 0.06 \sin(2\pi y_0 + 0.58) - 0.018 \sin(2\pi y_0 + 0.58) \cos 2\pi x_0 \end{cases} \quad (16)$$

误差补偿方程组中, 补偿后的星点坐标 (x_0, y_0) 是未知数, 质心法计算的坐标 (x, y) 作为方程输入, 可解出补偿后的星点坐标 (x_0, y_0) 。

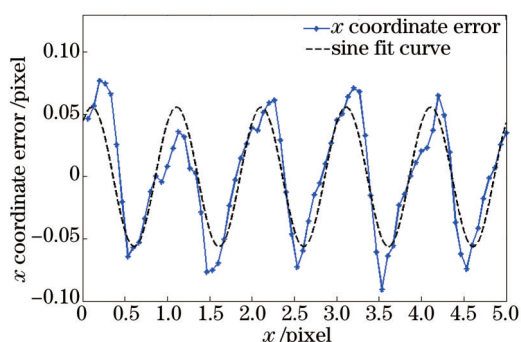


图 16 横坐标系统误差分布

Fig.16 Distribution of x coordinate systematic error

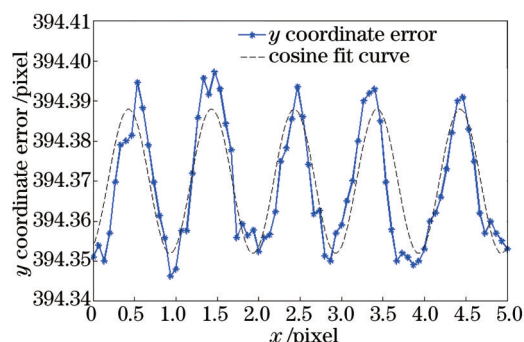


图 17 纵坐标变化曲线

Fig.17 Varying curves of y coordinate

实验中分别在中心视场和边缘视场采集两组数据用于检验误差补偿方程的补偿效果, 第一组在中心视场采样, 随即选取一处起始位置, 沿 x 轴方向平移, 每隔 $1 \mu\text{m}$ 对星点进行一星图采样, 采样 31 次, 行程为 2 pixel, 通过质心法定位出星点坐标后, 通过误差补偿方程组补偿系统误差。第一组星点采样数据补偿前后系统误差对比如图 18 所示, 补偿前后星点横坐标数据如表 1 所示。

改变平行光管与星敏镜头光轴的夹角, 在边缘视场下进行第二组星图采样, 同样沿 x 轴方向平移, 每隔 $1 \mu\text{m}$ 拍摄一幅星点图, 采样 31 次, 行程为 2 pixel, 通过质心法定位出星点坐标后, 通过误差补偿方程组补偿系统误差。第二组星点采样数据补偿前后系统误差对比如图 19 所示, 补偿前后星点横坐标如表 2 所示。

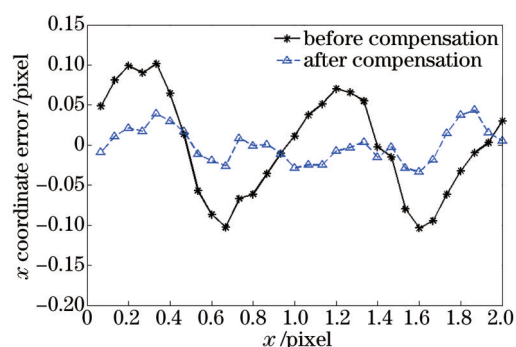


图 18 第一组误差补偿

Fig.18 Compensation for the first group

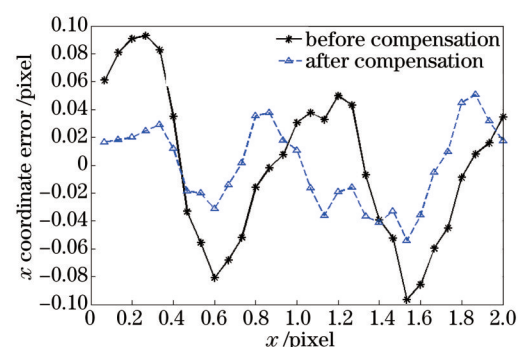


图 19 第二组误差补偿

Fig.19 Compensation for the second group

第一组采样星图进行误差补偿前横坐标星点定位系统误差标准为 0.0646 pixel , 补偿后为 0.0216 pixel , 定位精度提高了 66.56%。第二组采样星图误差补偿前横坐标星点定位系统误差标准为 0.0673 pixel , 补偿后为 0.0288 pixel , 定位精度提高了 57.21%。传统正弦拟合补偿的方法补偿效果为精度提高 35.7%^[1]。可见, 误差补偿方程组对星点定位系统误差的补偿效果与传统正弦曲线拟合补偿的方法相比得到了明显地提高。

表 1 第一组星点采样误差补偿前后横坐标对比

Table 1 Comparison of the x coordinate before and after the compensation for the first group data

NO.	x before compensation / pixel	x after compensation / pixel	NO.	x before compensation /pixel	x after compensation / pixel	NO.	x before compensation / pixel	x after compensation / pixel
1	487.8997	487.8940	12	487.0649	487.1175	23	486.3314	486.3511
2	487.8445	487.8024	13	487.0343	487.0847	24	486.2204	486.2624
3	487.7978	487.7376	14	486.9818	487.0204	25	486.1647	486.2137
4	487.7413	487.6725	15	486.9245	486.9353	26	486.1237	486.1773
5	487.6766	487.6104	16	486.8808	486.8625	27	486.0718	486.1256
6	487.5996	487.5479	17	486.8213	486.7698	28	486.0414	486.0939
7	487.4852	487.4636	18	486.7498	486.6832	29	485.9915	486.0333
8	487.3504	487.3656	19	486.7000	486.6332	30	485.9329	485.9487
9	487.2613	487.2967	20	486.6268	486.5695	31	485.8848	485.8692
10	487.1695	487.2181	21	486.5100	486.4815			
11	487.1154	487.1686	22	486.4110	486.4101			

表 2 第二组星点采样误差补偿前后横坐标对比

Table 2 Comparison of the x coordinate before and after the compensation for the second group data

NO.	x before compensation / pixel	x after compensation / pixel	NO.	x before compensation / pixel	x after compensation / pixel	NO.	x before compensation / pixel	x after compensation / pixel
1	887.8765	887.8480	12	887.0506	887.1254	23	886.3694	886.3817
2	887.8327	887.7750	13	886.9897	887.0493	24	886.2378	886.2884
3	887.7987	887.7283	14	886.9486	886.9844	25	886.1472	886.2166
4	887.7499	887.6723	15	886.9071	886.9065	26	886.0900	886.1651
5	887.6746	887.6015	16	886.8620	886.8220	27	886.0560	886.1313
6	887.6192	887.5567	17	886.8219	886.7593	28	886.0185	886.0875
7	887.5155	887.4811	18	886.7689	886.6927	29	885.9746	886.0274
8	887.3979	887.4011	19	886.7212	886.6436	30	885.9205	885.9327
9	887.2607	887.3055	20	886.6501	886.5812	31	885.8809	885.8561
10	887.1645	887.2309	21	886.5726	886.5218			
11	887.0816	887.1573	22	886.4488	886.4355			

5 结 论

对星点定位系统误差进行的频域分析采用可变的点扩展函数,得到了星点定位系统误差理论分布解析式,更准确地描述了星点定位系统误差分布。根据由 Code V 导出的光学系统点扩展函数数据,采用蒙特卡罗法对星点定位系统误差进行了数值仿真,仿真结果与频域分析结果相符,印证了频域分析的正确性。将频域分析得到的星点定位系统误差解析式近似后,得到误差补偿方程组。在实验中,拟合得到误差补偿方程组的系数,利用得到的误差补偿方程组对两组不同视场下的 5 pixel×5 pixel 大小星点目标的采样数据进行了误差补偿,取得了良好的补偿效果。对中心视场附近星点采样数据,误差补偿前横坐标系统误差标准差为 0.0646 pixel,补偿后为 0.0216 pixel,精度提高了 66.56%。对边缘视场星点采样数据,误差补偿前,横坐标系统误差标准差为 0.0673 pixel,补偿后为 0.0288 pixel,精度提高了 57.21%。实验结果表明,提出采用空间变化点扩展函数的频域分析与传统的基于高斯点扩展函数模型的频域分析相比,对星点定位系统误差分布描述更加准确,由其导出的误差补偿方程组的补偿效果总体优于传统正弦拟合补偿的方法。

- 1 Wei Xinguo, Xu Jia, Zhang Guangjun. S-curve error compensation of compensation of centroid location for star sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 849-857.
魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏传感器质心定位的S曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
- 2 F Brian Alexander, Kim Chew Ng. Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation[J]. Opt Engineering, 1991, 30(9): 1320-1331.
- 3 Liao Yufu, Zhong Jianyong. A new method used for star distillation of near-infrared star image of star tracker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1667-1671.
廖育富, 钟建勇. 一种新的方法用于星敏传感器近红外星图星点提取[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1667-1671.
- 4 G Rufino, D Accardo. Enhancement of the centroid algorithm for star tracker measure refinement[J]. Acta Astronautica, 2003, 53(2): 135-147.
- 5 Zhang Guangjun. Star Identification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- 6 Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan, *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 1002-1010.
杨君, 张涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1002-1010.
- 7 Sun Jinqu, Zhou Jun, Zhang Zhen, *et al.*. Centroid location for space targets based on energy accumulation[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 3043-3048.
孙瑾秋, 周军, 张臻, 等. 基于能量累加的空间目标星像质心定位[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 3043-3048.
- 8 Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1672-1677.
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- 9 Wang Haiyong, Wu Wenqin, Xue Xiaofeng, *et al.*. Star image extracting based on local region growing around peaks in blocks[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2507-2515.
王海涌, 武文卿, 薛晓峰, 等. 分块峰值点局部区域生长的星像定位[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2507-2515.
- 10 Wei Wei, Liu Enhai. Processing of infrared star map and position accuracy analysis of star point[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 991-996.
魏伟, 刘恩海. 红外星图预处理及星点定位精度分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 991-996.
- 11 Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Optical system error analysis of high accuracy star trackers[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323003.
孙婷, 邢飞, 尤政. 高精度星敏传感器光学系统误差分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323003.
- 12 Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0716003.
陈启梦, 张国玉, 孙向阳. 高精度LCOS动态星模拟器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0716003.
- 13 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522005.
李璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
- 14 Wang Haiyong, Jin Guangrui, Zhao Yanwu. Applicable probability distribution model of refracted star number in field of view of indirectly sensing horizon star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 1201002.
王海涌, 金光瑞, 赵彦武. 间接敏感地平星敏传感器视场内折射星数的概率分布适用模型[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 1201002.
- 15 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0822001.
巩盾, 田铁印, 王红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822001.
- 16 Chen Shu, Zhang Guangjun, Zheng Xunjiang, *et al.*. Technology of miniature star sensor[J]. Aerospace Shanghai, 2013, 30(4): 69-78.
陈纾, 张广军, 郑循江, 等. 小型化星敏传感器技术[J]. 上海航天, 2013, 30(4): 69-78.
- 17 Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Gao Yujun, *et al.*. Technology of miniature star sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2822-2827.
孙高飞, 张国玉, 高玉军, 等. 星敏传感器地面标定设备的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2822-2827.