

点扩散函数对星点提取误差分析的影响

姜亮^{1,2}, 张宇¹, 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: 星点提取系统误差又称作像元频率误差, 它的分布呈现以像元为周期的规律性, 分析它的分布规律对补偿这种误差有指导作用。光学系统点扩散函数类型是影响星点提取系统误差分布的主要因素, 选取合理的点扩散函数模型对星点提取系统误差进行频域分析, 可以减小分析结果与实际的偏离, 提高误差补偿效果。传统方法采用 Gauss 分布点扩散函数模型进行频域分析, 但没有考察它的合理性。文中结合星敏感器拍摄的星点像, 将一种 Giancarlo 点扩散函数模型与 Gauss 点扩散函数模型进行了比较。并在星点提取系统误差频域分析中采用 Giancarlo 点扩散函数模型, 推得星点坐标提取误差理论解析式。与传统频域分析结果相比, 文中频域分析结果中引入了对 S 曲线振幅起调制作用的项, 使得星点横坐标系统误差沿 x 轴呈现 S 曲线分布的同时, 其振幅沿 y 轴方向发生改变。随后在噪声条件下对星点提取系统误差进行了仿真, 仿真结果与频域分析结果相符。最后进行了实验验证, 根据理论解析式对结果进行了误差补偿, 星点提取精度提高了 54.42%, 优于传统正弦拟合补偿方法。

关键词: 星敏感器; 星点提取系统误差; 频域分析; 系统误差补偿

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3437-09

Effect of point spread functions on star centroid error analysis

Jiang Liang^{1,2}, Zhang Yu¹, Zhang Ligu¹, Zhang Xingxiang¹, Ren Jianyue¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Star centroid systematic error is called pixel frequency error, whose period is the width of the pixel. The analysis of the distribution of systematic error is useful in error compensation. Point spread function is the main factor which affects the distribution of systematic error. Traditionally the Gauss point spread function is used in the frequency analysis of the systematic error, but its reasonability has not been taken into consideration. With real star image considered, the Giancarlo point spread function was compared with the Gauss point spread function. Then the Giancarlo point spread function was used in the spacial frequency analysis of star centroid systematic error, and the theoretical formulas of the systematic error was obtained. Compared with the result of the traditional frequency analysis, an item that modulated the amplitude of the S curve distribution was added to the theoretical formulas, and that made the x

收稿日期: 2015-03-07; 修订日期: 2015-04-12

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 姜亮(1985-), 男, 博士生, 主要从事星敏感器相关算法研究。Email: 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。Email: renjy@ciomp.ac.cn

coordinate systematic error distributed as an S curve along x axis and the amplitude of S curve changed along y axis. A simulation under a condition with noise was carried out, and the result was in accordance with the frequency analysis of this article. Finally an experiment is done, the result of the experiment is compensated for according to the theoretical formulas, the star centroid accuracy is improved by 54.42%, which is better than the traditional sine curve fitting compensation method.

Key words: star tracker; star centroid systematic error; frequency analysis; compensation of systematic error

0 引言

星敏传感器作为一种高精度姿态传感器,在卫星姿态测量中起着重要的作用。随着航天技术的快速发展,各类卫星对姿态信息的精度要求不断提高。其中对地观测卫星的姿态角精度一般要求高于 0.01° ,有时甚至高于 0.001° 。提高星敏传感器的精度就成为了一个亟待解决的问题。

星敏传感器全天自主工作模式下工作过程包括四个环节:星图拍摄,星点提取,星图识别和姿态解算。星敏传感器的星点提取系统误差不但影响星图识别成功率,而且会在姿态解算环节影响星敏传感器的输出姿态角精度。因此,补偿星点提取系统误差是提高星敏传感器系统精度的重要途径。传统方法采用基于 Gauss 点扩散函数模型的频域分析,得到了星点提取系统误差呈现 S 曲线分布的结论^[1],并对星点提取系统误差进行正弦拟合补偿。

文中首先从频谱混叠的角度分析了星点提取系统误差产生的原因。结合星敏传感器拍摄的星点像,分析了 Gauss 点扩散函数模型与星敏传感器光学系统点扩散函数之间的偏差以及这种偏差造成的影响。文中星点提取系统误差的频域分析采用 Giancarlo 点扩散函数模型^[2]代替了 Gauss 点扩散函数模型,得到了星点坐标提取系统误差的理论解析式。然后在 Matlab 中对星点提取系统误差进行了数值仿真,仿真结果显示星点提取系统误差呈现 S 曲线分布,并发现 S 曲线^[1]的振幅呈现类余弦变化的现象,用频域分析得到的理论解析式解释了这种 S 曲线振幅周期性变化的现象。最后在实验中对星点弥散斑尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 星点目标进行了星点提取系统误差测量与补偿,验证了文中提出的误差补偿方程组对星点提取系统误差的补偿效果。

1 星点提取算法

1.1 星点提取算法原理

星点提取的方法主要包括:灰度加权质心法(质心法),灰度平方加权质心法,Gauss 曲面拟合法等。其中应用最多的是灰度加权质心法,这种方法计算简单,并且鲁棒性好,应用广泛。在质心法的计算过程中,将像元中心等同于像元内灰度分布平衡点,这种近似是造成星点坐标提系统误差的主要原因。

质心法星点坐标计算公式如下^[1,3-4]:

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

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

式中: (x_i, y_i) 为组成该星点弥散斑的第 i 个像素对应坐标; g_i 为该像元对应的灰度值。

1.2 星点采样过程分析

为了简化星点采样过程,不考虑采样窗口对采样结果的影响,过程分为两步:

(1) 点扩散函数 $I(x, y)$ 与像元响应函数卷积,得到星点能量接收函数 $f(x, y)$; (2) 星点能量接收函数 $f(x, y)$ 与单位脉冲采样函数 $s(x, y)$ 相乘,得到星点数字图像 $g(x, y)$ 。

$$\text{可知: } g(x, y) = I(x, y) \otimes p(x, y) \times s(x, y) \quad (3)$$

从空域看,采用质心法提取星点坐标的系统误差产生的原因是在算法中采用了像元光敏区中心坐标代替灰度平衡点坐标进行计算;而从空间频域看,系统误差产生的原因是 $f(x, y)$ 的频谱搬移后产生的频谱混叠。

下面对星点采样过程进行频谱分析,为了简化描述,先对一维条纹采样的情况进行说明,然后推广

至二维星点采样。一维条纹采样中,条纹与 y 轴平行,为黑底白条纹,质心法在这种情况下,计算的是条纹的中心横坐标位置 x_0 。

在图 1(a)中, $a(x)$ 表示条纹的理想轮廓,用虚线表示; $I(x)$ 表示 $a(x)$ 经过光学系统线扩散函数卷积后,条纹在 CCD 或 CMOS 器件表面上的轮廓。在图 1(b)中, $p(x)$ 表示像元响应函数沿 x 轴的波形。在图 1(c)中, $f(x)$ 表示 $I(x)$ 与 $p(x)$ 卷积的结果。在图 1(d)中, $s(x)$ 表示单位脉冲采样函数。在图 1(e)中, $g(x)$ 表示条纹的一维数字图像。

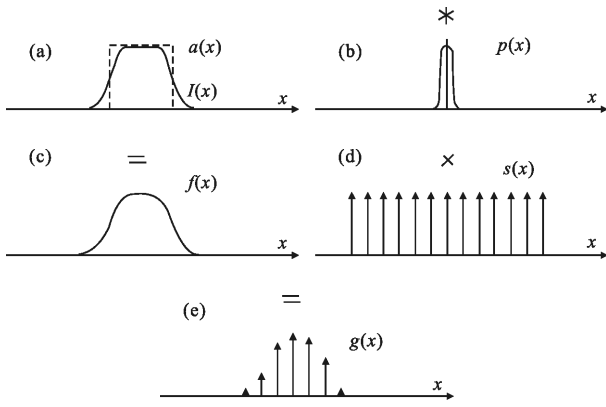


图 1 条纹采样模型

Fig.1 Model of stripe sampling

用质心法计算 $f(x)$ 、 $g(x)$ 的中心,则有公式(4)、(5):

$$\bar{x}_f = \frac{\int xf(x)dx}{\int f(x)dx} \quad (4)$$

$$\bar{x}_g = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} = \frac{\int x \cdot g(x)dx}{\int g(x)dx} \quad (5)$$

从条纹采样过程的模型来看,如果像元响应函数 $p(x)$ 是轴对称的,那么 $f(x)$ 的中心 \bar{x}_f 跟 $I(x)$ 的中心重合。然后对应到频域进行分析,如图 2 所示。

由公式(1)以及傅里叶变换的性质可推得:

$$\bar{x}_f = \frac{\int xf(x)dx}{\int f(x)dx} = -\frac{F'(0)}{j2\pi F(0)} \quad (6)$$

$$\bar{x}_g = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} = \frac{\int x \cdot g(x)dx}{\int g(x)dx} = -\frac{G'(0)}{j2\pi G(0)} \quad (7)$$

由公式(3)可知, $F(f)$ 的截止频率 f_c 仅需等于采

样频率 f_s , $G(f)$ 在 $f=0$ 处就不会有频谱的混叠,那么就有 $\bar{x}_g = \bar{x}_f$,则由质心法算得的 \bar{x}_g 就等于条纹的真实中心位置 x_0 ,此时质心法不会产生系统误差。

但这对于星敏感器系统是不可实现的,受图像传感器限制,采样频率不能无限增大。星点图像是黑色背景下的明亮光斑,频谱的高频分量较丰富。光学系统的截止频率为 $f_c=1/\lambda F\#$,增大 $F\#$, f_c 减小,但当 $F\#$ 过大,相对孔径过小,会使接收的光能过小,而星光本身相对微弱,这使系统信噪比大幅下降,信号被噪声掩盖。

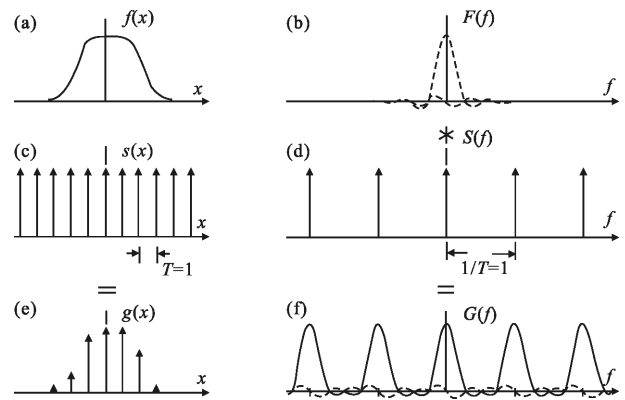


图 2 条纹采样频域模型

Fig.2 Model of stripe sampling in frequency domain

由此可知,改变光学系统,或者使用像元尺寸小的图像传感器,都不能有效消除 $G(f)$ 在 0 点处的频谱混叠,要消除条纹中心坐标提取的系统误差,目前只能用非线性补偿的方法处理。

推广至二维的星点坐标提取,采用质心法,算法计算坐标为^[5]:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} = \frac{\iint x \cdot g(x, y) dx dy}{\iint g(x, y) dx dy} = -\frac{G'_x(0, 0)}{j2\pi G(0, 0)} \quad (8)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} = \frac{\iint y \cdot g(x, y) dx dy}{\iint g(x, y) dx dy} = -\frac{G'_y(0, 0)}{j2\pi G(0, 0)} \quad (9)$$

2 点扩散函数模型选取与频域分析

2.1 点扩散函数近似模型的选取

点扩散函数是影响星点提取系统误差分布的主

要因素,却常常不被考虑在内。传统星点提取系统误差频域分析中采用的点扩散函数模型为 Gauss 分布^[1,4,6-8]。Gauss 点扩散函数模型是对光学成像相机光学系统点扩散函数的一种近似,没有将离焦作用考虑在内,适用于清晰成像的情况,此时光学系统的点扩散函数采用 Gauss 点扩散函数近似是合理的。而星敏感器与光学成像相机存在区别,为了达到亚像元细分定位的目的,它多采用离焦技术(defocus),使星点弥散斑扩大至数个像元。离焦作用使星点弥散斑扩大,弥散斑内部能量分布均匀化,对应的点扩散函数形态发生改变,图 3 为采用菲涅耳衍射理论对离焦光学系统点扩散函数进行数值仿真得到的结果。将点扩散函数近似为 Gauss 分布进行分析,合理性有待考察。高斯点扩散函数模型解析式为:

$$I(x,y)=\frac{I_0}{2\pi\sigma^2}\cdot\exp\left\{-\frac{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2]}{2\sigma^2}\right\} \quad (10)$$

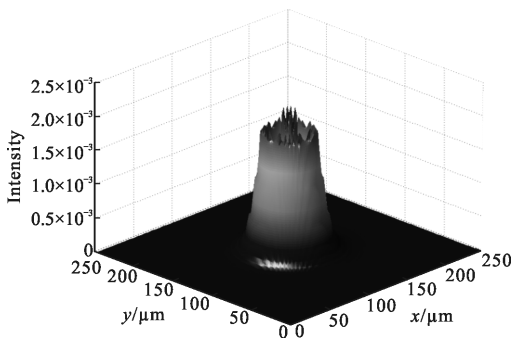


图 3 离焦作用下的点扩散函数
Fig.3 PSF defocused

将 Gauss 点扩散函数模型与实验中拍摄的星点像进行分析比较,图 4 为 Gauss 点扩散函数模型示意图,图 5 为单星星点像。

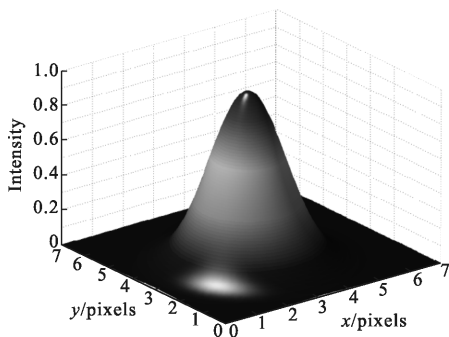


图 4 高斯点扩散函数模型
Fig.4 Gauss PSF model

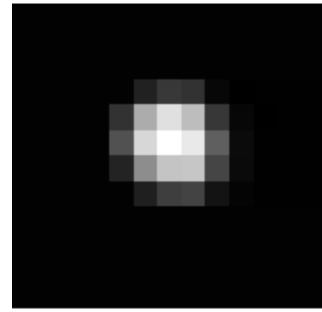


图 5 单星星点像
Fig.5 Single star image

图 5 单星星点像中,与中心最亮像元临近的像元灰度值均匀,且灰度值与中心像元接近,边缘像元灰度值快速减小,中间的 9 个像元灰度值均在 550 左右,中间最亮像元灰度值略高为 573。与中心像元临近的像元灰度值接近中心像元灰度,边缘像元灰度值快速下降,与 Gauss 分布存在较大的偏差。当采用 Gauss 曲面拟合的方法提取星点质心时,对星等低的亮星星点提取会产生很大的偏差^[5],如图 6 所示。

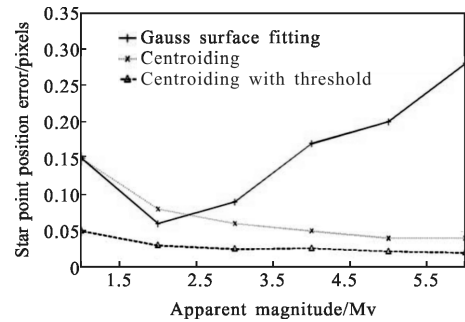


图 6 星点提取误差与星等关系

Fig.6 Relationship between star centroid error and magnitude

采用 Gauss 曲面拟合法提取星点坐标,在星等较低时偏差极大,达到了 0.28 pixel。这是由于星点能量分布不符合 Gauss 分布,而又采用 Gauss 曲面拟合的方法提取星点造成的。

Giancarlo 对星点能量分布进行了分析,建立了两种分布模型,一种仅考虑离焦作用,另一种考虑离焦与衍射共同作用。

考虑离焦作用时的光学传递函数,表达式为^[2]:

$$OTF=2\frac{J_1(\pi cf)}{\pi cf} \quad (11)$$

式中: $J_1(x)$ 为 1 阶贝塞耳函数; C 为弥散斑半径; f 为空间频率。 $C=\delta_z/F_\#, \delta_z$ 为离焦量; $F_\#$ 为光学系统 F

数, $F_{\#} \approx 1$ 。经过傅里叶反变换可得到点扩散函数 (PSF), 如图 7 所示。

考虑离焦与衍射作用时 OTF 的表达式为^[2]:

$$\text{OTF} = \begin{cases} \frac{4}{\pi a} \int_0^{\sqrt{1-(0.5s)^2}} \sin[a\sqrt{1-y^2-s}] dy, s < 1 \\ 0, s \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $s = \lambda F_{\#} f$, $a = \pi f \delta_z / F_{\#}$, δ_z 为离焦量, $F_{\#}$ 为光学系统 F 数, $F_{\#} \approx 1$ 。

对比 Giancarlo 建立的两种 PSF 模型, 看出离焦作用下的模型更为简化, 文中下面将采用公式(11)中的点扩散函数模型来进行星点提取系统误差频域分析, 以获得基于 Giancarlo 点扩散函数模型的星点提取系统误差理论解析式。

2.2 频域分析条件

星点采样图像在空间频域对应:

$$G(u, v) = I(u, v) \cdot P(u, v) \otimes S(u, v) \quad (13)$$

基于 Giancarlo 点扩散函数模型进行系统误差频域分析, 设定星点真实中心在 (x_0, y_0) 处, 则:

$$\text{OTF} = I_0 \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{J_1(\pi c \sqrt{u^2 + v^2})}{\sqrt{u^2 + v^2}} \cdot e^{-j2\pi(u x_0 + v y_0)} \quad (14)$$

CMOS 器件的结构如图 7 所示, 阴影区表示像

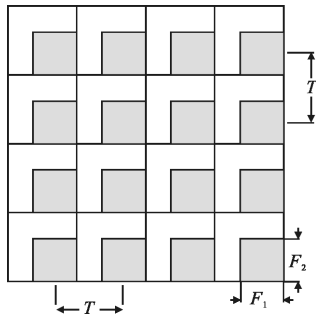


图 7 CMOS 器件结构图
Fig.7 Structure of CMOS

$$G(u, v) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{5 \sin[0.8\pi(m-u)] \sin[0.8\pi(n-v)] J_1(5\pi \sqrt{(m-u)^2 + (n-v)^2})}{2\pi^2(m-u)(n-v) \sqrt{(m-u)^2 + (n-v)^2}} e^{j2\pi[x_0(m-u) + y_0(n-v)]} \quad (18)$$

将公式(18)代入公式(8)得:

$$x = x_0 + \frac{\sum_{m=1}^{+\infty} a_1 \sin 2\pi m x_0}{-\pi G(0, 0)} + \frac{\sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} a_2 \sin 2\pi m x_0 \cos 2\pi n y_0}{-\pi G(0, 0)} \quad (19)$$

星点横坐标提取系统误差:

$$\delta_x = \frac{\sum_{m=1}^{+\infty} a_1 \sin 2\pi m x_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} a_2 \sin 2\pi m x_0 \cos 2\pi n y_0}{-\pi G(0, 0)} \quad (20)$$

元光敏区, T 为像元宽度, 设为单位长度 1, F_1 、 F_2 分别表示光敏区横向、纵向宽度占像元宽度的比例。图 8 为归一化像元响应函数模型。

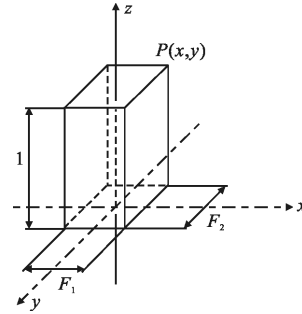


图 8 像元响应函数

Fig.8 Pixel sensitivity function

将像元响应函数^[1]假定为像元光敏区的均匀分布, 其频域对应:

$$P(u, v) = F_1 F_2 \frac{\sin(\pi u F_1)}{\pi u F_1} \frac{\sin(\pi v F_2)}{\pi v F_2} \quad (15)$$

采样函数为单位脉冲采样函数, 其频域对应:

$$S(u, v) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(u-m) \delta(v-n) \quad (16)$$

由于设 $T=1$, 则 m, n 分别对应 u, v 方向频谱搬移量 m/T 和 n/T 。

2.3 系统误差解析式推导

将公式(14)~(16)代入公式(13), 得:

$$G(u, v) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{c F_1 F_2 I_0}{2} \cdot \frac{J_1(\pi c \sqrt{(u-m)^2 + (v-n)^2})}{\sqrt{(u-m)^2 + (v-n)^2}} \cdot \frac{\sin[\pi(u-m)F_1]}{\pi(u-m)F_1} \frac{\sin[\pi(v-n)F_2]}{\pi(v-n)F_2} \cdot e^{-j2\pi[(u-m)x_0 + (v-n)y_0]} \quad (17)$$

由 x 轴与 y 轴两个方向的对称性, 对 x 轴方向得出的结论对 y 轴方向也是适用的, 因此仅分析 x 。为简化计算, 令 $F_1=0.8, F_2=0.8, c=5$ 。

$$\begin{aligned} \text{其中 } a_1 &= \frac{6 \sin(0.8\pi m) J_1(5\pi m)}{\pi m^3} - \frac{10 \sin(0.8\pi m) J_0(5\pi m) + 1.6 \cos(0.8\pi m) J_1(5\pi m)}{m^2} \\ a_2 &= \left\{ \frac{4 \sin(0.8\pi m) \sin(0.8\pi n) J_1(5\pi \sqrt{m^2 + n^2})}{0.8\pi^2 m^2 n \sqrt{m^2 + n^2}} + \frac{10 \sin(0.8\pi m) \sin(0.8\pi n) J_1(5\pi \sqrt{m^2 + n^2})}{\pi^2 (m^2 + n^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{25\sin(0.8\pi m)\sin(0.8\pi n)J_0(5\pi\sqrt{m^2+n^2})}{\pi n(m^2+n^2)} - \frac{4\cos(0.8\pi m)\sin(0.8\pi n)J_1(5\pi\sqrt{m^2+n^2})}{\pi mn\sqrt{m^2+n^2}}$$

由 x 轴方向与 y 轴方向的对称性, 得到星点坐标提取系统误差的解析表达式:

$$\delta_y = \frac{\sum_{m=1}^{+\infty} a_1 \sin 2\pi m y_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} a_2 \sin 2\pi m y_0 \cos 2\pi n x_0}{-\pi G(0,0)} \quad (21)$$

公式(20)、(21)分别是星点横、纵坐标提取系统误差的理论解析式,它们分别描述了星点横、纵坐标系统误差在图像传感器坐标平面内的分布。与采用 Gauss 点扩散函数模型的星点提取系统误差频域分析得到的理论解析式相比多出了振幅调制项 $\sin 2\pi m x \cos 2\pi n y$, 这一项使星点提取系统误差呈现 S 曲线^[1]分布的同时, 振幅发生类余弦周期性变化。而采用 Gauss 点扩散函数模型分析的结果仅是, 星点提取系统误差呈类正弦变化, 其振幅不改变。

根据星点误差解析公式(20)、(21), 将分子中的无穷级数取前两项近似, 可以得到误差补偿方程组:

$$\begin{cases} x = x_0 + k_1 \sin 2\pi x_0 + k_2 \cos 2\pi y_0 \sin 2\pi x_0 \\ y = y_0 + k_1 \sin 2\pi y_0 + k_2 \cos 2\pi x_0 \sin 2\pi y_0 \end{cases} \quad (22)$$

2.4 频域分析结果对比

如果采用 Gauss 形点扩散函数分析, 设定星点真实中心在 (x_0, y_0) 处, 则:

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

其傅里叶变换为 OTF, 形式为:

$$\text{OTF} = I_0 \cdot e^{-2\pi^2\sigma^2(u^2+v^2)} \cdot e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)} \quad (24)$$

与 2.3 节同理推得星点横坐标提取系统误差:

$$\delta_x = x - x_0 = \frac{\sum_{m=1}^{+\infty} b_1 \cdot 2j \sin 2\pi m x_0}{-j2\pi G(0,0)} + \frac{\sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} b_2 \cdot 4j \sin 2\pi m x_0 \cos 2\pi n y_0}{-j2\pi G(0,0)} \quad (25)$$

其中 b_1 与 b_2 为系数:

$$b_1 = e^{-2\pi^2 m^2} \left\{ \frac{F_1 \sin \pi F_1 m - m \pi F_1 F_2 \cos \pi F_1 m}{\pi m^2} + 4\sigma^2 \pi F_2 \sin \pi F_1 m \right\}$$

$$b_2 = e^{-2\pi^2 (m^2+n^2)} \left\{ \frac{\sin \pi F_1 m \sin \pi F_2 n - \pi m F_1 \cos \pi F_1 m \sin \pi F_2 n}{\pi m^2 n} + \frac{4\sigma^2 \sin \pi F_1 m \sin \pi F_2 n}{\pi n} \right\}$$

由于 $e^{-2\pi^2(m^2+n^2)} \ll e^{-2\pi^2 m^2}$, 第二项振幅调制项的系数 b_2 远小于第一项主项系数 b_1 , S 曲线的振幅近似不发生变化。也就是说, 虽然 Gauss 点扩散函数对应的频域分析结果中存在振幅调制项, 但由于系数相对于主项极小, 可以忽略。

Giancarlo 点扩散函数模型对应的频域分析结果中振幅调制项的系数相对于第一项不可忽略, 这就使得 S 曲线的振幅发生了周期性的改变。

3 仿真与实验

3.1 Matlab 仿真

仿真实验中, 将星点弥散斑中心 (x_0, y_0) 每次沿 x 坐标轴移动 0.05 个像元宽度, 移动范围为 50~53 pixel, y 轴上移动范围为 50~53 pixel。仿真实验采集了 61 行 61 列, 共 3721 个位置的星点横纵坐标提取系统误差。

表 1 仿真条件

Tab.1 Conditions for the simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Visual magnitude	2 Mv	Noise level (in gray value)	mean=3 rms=0.2
PSF patent	Giancarlo	PSF diameter	5 pixels
Pixel dimension	15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$	Fill factor	0.64
Photosensitive area shape	Square	Photosensitive area position	Lower right corner of pixel

仿真中, 向星点像加入均值为 $\overline{x_{\text{noise}}}=3$, 标准差为 $\sigma_{\text{noise}}=0.2$ 的 Gauss 白噪声^[9-10]。因此设定灰度阈值为 $V_{\text{th}} = \overline{x_{\text{noise}}} + 5\sigma_{\text{noise}} = 4$ (数值均为灰度值)。采用域值法^[4]进行阈值分割后, 再进行连通域分析, 用质心法提取出星点坐标。星点提取横坐标系统误差仿真结果如图 9 所示。

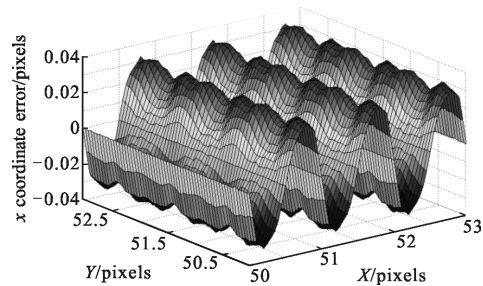


图 9 δ_x 仿真分布

Fig.9 Distribution of simulation of δ_x

仿真结果与频域分析中推导出的理论分布相符,即星点提取横坐标系统误差沿 x 轴呈现 S 曲线分布, S 曲线的振幅沿 y 轴呈现类余弦周期性变化。

将 $y=50$ 和 $y=50.5$ 的系统误差曲线截取出来,作对比如图 10 所示。

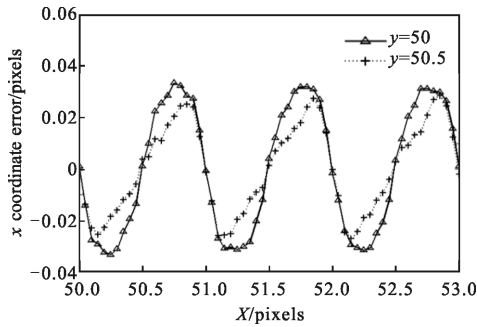


图 10 不同 y 坐标下 δ_x 分布对比图

Fig.10 Comparison of the distributions of δ_x for different y coordinates

当 y 坐标改变时, δ_x 类正弦分布的振幅也改变,这种振幅的变化与理论解析式中 $\sin 2\pi m x_0 \cos 2\pi n y_0$ 相对应。图 9 中 $y=50$ 和 $y=50.5$ 对应的两条 S 曲线分别对应 S 曲线振幅变化曲线的波峰与波谷,对两条 S 曲线分别进行正弦拟合可得两条 S 曲线幅值分别为 -0.35 和 -0.23 ,进而得到振幅调制项的系数 $k_2 \approx -0.06$,两条曲线拟合过程如图 11、图 12 所示。

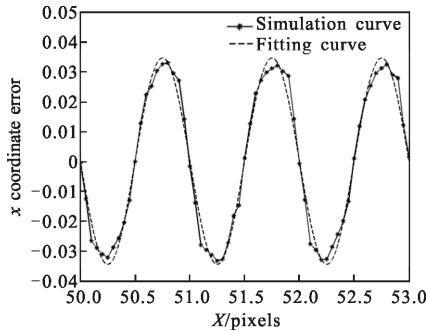


图 11 横坐标系统误差分布

Fig.11 Distribution of x coordinate error

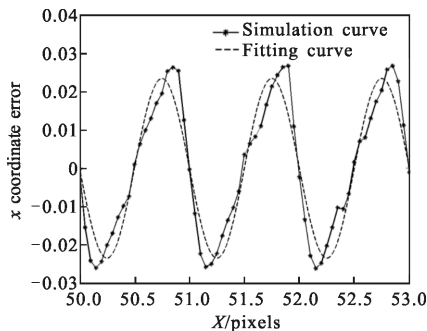


图 12 横坐标系统误差分布

Fig.12 Distribution of x coordinate error

噪声对 δ_x 分布的影响也是不可忽略的,仿真结果与实验结果存在一定的偏差,误差补偿方程组的系数在实际应用中应通过测量数据拟合得到。

3.2 实验验证

星点定位系统误差测试系统由卤钨灯、积分球、平行光管、高精度三轴平移台(精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$)、稳定平台构成,实验装置示意图如图 13 所示。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。平移台的移动,使弥散斑在图像传感器阵列表面产生相对位移。平移台的 x 轴、 y 轴分别对应 CMOS 探测器 x 轴、 y 轴。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,光敏区的形状、位置未给出。

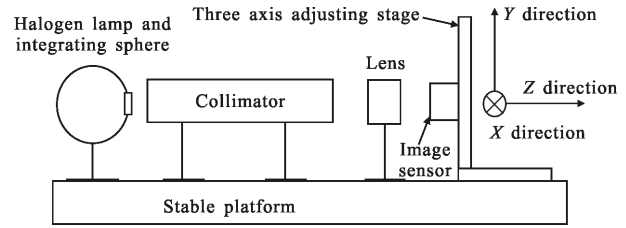


图 13 星点定位误差测量设备示意图

Fig.13 Illustration of the equipment for star centroid error measurement

首先对弥散斑尺寸为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的星点目标进行测量,调节平行光管与星敏光学系统光轴平行,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 $0.5 \mu\text{m}$ 为间隔 ($1/30 \text{ pixel}$),在每个位置拍摄一幅星点像,共拍摄 151 幅星点像。由于光斑的真实位置难以测量,文中通过测增量的方法测量星点提取系统误差,测量结果与拟合曲线如图 14 所示。

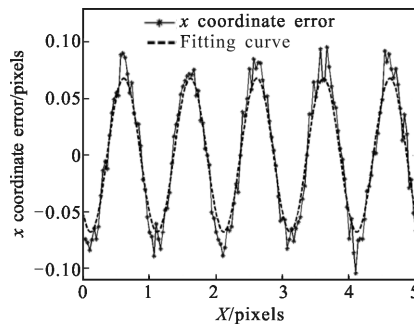


图 14 横坐标系统误差分布

Fig.14 Distribution of x coordinate error

这 151 幅星点图内星点的纵坐标算法计算值呈类正弦变化规律,周期为一个像元宽度,这与频域分析以及仿真结果相符。理论解析式纵坐标计算值 $y=y_0+k_1\sin 2\pi m y_0+k_2\sin 2\pi m y_0\cos 2\pi n x_0$ 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 呈类余弦变化,如图 15 所示。

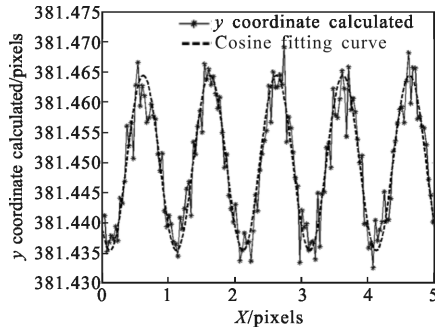


图 15 y 曲线

Fig.15 Curve of y

结合图 11、图 12,基于最小二乘法拟合,拟合后可得 $k_1=-0.069$, $k_2=-0.015\text{pixel}$, 正弦曲线初始相位为 0.61。得到具体的误差补偿方程组公式(26):

$$\begin{cases} x=x_0-0.069\sin(2\pi x_0+0.61)-0.015\sin(2\pi x_0+0.61)\cos 2\pi y_0 \\ y=y_0-0.069\sin(2\pi y_0+0.61)-0.015\sin(2\pi y_0+0.61)\cos 2\pi x_0 \end{cases} \quad (26)$$

通过误差补偿方程组对这一组 151 幅星图星点横坐标系统误差进行补偿^[11-13],补偿前后系统误差对比如图 16 所示。

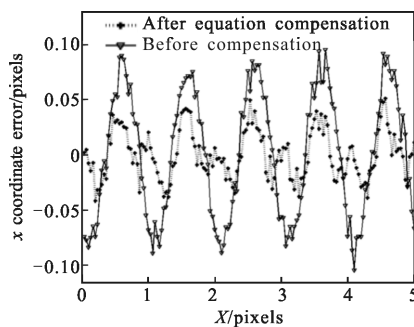


图 16 误差补偿方程组补偿效果

Fig.16 Effect of equation set compensation

采用 Gauss 点扩散函数模型分析,则拟合得到的 S 曲线方程不含振幅调制项,正弦拟合得到 S 曲线表达式为:

$$x=x_0-0.069\sin(2\pi x_0+0.61) \quad (27)$$

通过正弦拟合补偿法对这一组 151 幅星图星点横坐标系统误差进行补偿,补偿前后系统误差对比

如图 17 所示。

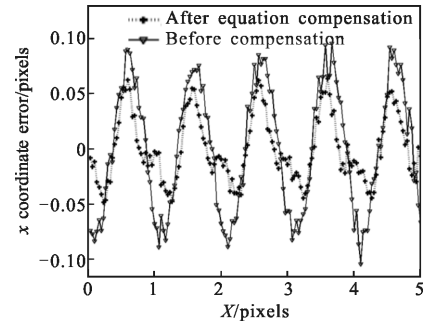


图 17 正弦拟合误差补偿效果

Fig.17 Effect of the sine curve fitting compensation

采用误差补偿方程对 151 幅星点图进行误差补偿前,横坐标星点定位系统误差标准差为 0.057 7 pixel,补偿后为 0.026 3 pixel,定位精度提高了 54.42%。采用基于 Gauss 点扩散函数模型的正弦拟合补偿后为 0.036 4 pixel,定位精度提高了 36.92%。在相同实验条件下,误差补偿方程组对星点定位系统误差的补偿效果优于传统正弦曲线拟合补偿的方法。

4 结论

文中将一种考虑离焦作用的 Giancarlo 点扩散函数模型与传统频域分析中采用的 Gauss 点扩散函数模型进行了比较。将 Giancarlo 点扩散函数模型应用于星点提取系统误差频域分析,得到了新的星点提取系统误差理论解析式,与采用 Gauss 点扩散函数模型的频域分析结果相比,解析式中比传统分析结果多出了 S 曲线的振幅调制项。在加入 Gauss 噪声条件下进行了仿真,仿真结果显示,星点横坐标提取系统误差沿 x 轴呈 S 曲线分布,沿 y 轴曲线的振幅呈类余弦周期性变化,与频域分析结果相符。最后实验测量了星点提取系统误差,并采用误差补偿方程对其进行了补偿,定位精度提高了 54.42%,优于传统正弦拟合补偿方法。

采用 Giancarlo 点扩散函数模型取代传统的 Gauss 点扩散函数模型,来进行星点提取系统误差的频域分析,对工程应用具有一定的指导意义。但由于不同光学系统点扩散函数的改变以及图像传感器的像元结构、填充因子、噪声特性等参数的改变,星点提取系统误差分布也会随之变化。在工程应用中需要根据实验测量数据对误差补偿方程系数进行拟合,误差

补偿方程组的补偿效果有待进一步实验验证。

参考文献:

- [1] Wei Xinguo, Xu Jia, Zhang Guangjun. S-curve error compensation of centroid location for star sensors [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(4): 849-857. (in Chinese)
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] Giancarlo Rufino, Domenico Accardo. Enhancement of the centroid algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53: 135-147.
- [3] Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan, et al. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(4): 1002-1010. (in Chinese)
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.
- [4] Li Guangze, Liu Jinguo, Hao Zhihang. Research of subpixel subdivision location algorithm for star image based on biorthogonal wavelet [J]. *Opt Precision Eng*, 2005, 13: 217-221. (in Chinese)
李广泽, 刘金国, 郝志航. 基于双正交小波的星点细分定位方法研究[J]. 光学 精密工程, 2005, 13: 217-221.
- [5] Zhang Guangjun. Star Identification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [6] Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于 Gauss 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.
- [7] Wang Haiyong, Wu Wenqing, Xue Xiaofeng, et al. Star image extracting based on local region growing around peaks in blocks[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(11): 2507-2515. (in Chinese)
王海涌, 武文卿, 薛晓峰, 等. 分块峰值点局部区域生长的星像提取[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2507-2515.
- [8] Jia Hui, Yang Jiankun, Li Xiujian, et al. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star tracker [J]. *Sci China Tech Sci*, 2011, 41(1): 69-76. (in Chinese)
贾辉, 杨建坤, 李修建, 等. 星敏传感器高精度星点提取系统误差分析及补偿方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(1): 69-76.
- [9] Zhi Shuai, Zhang Liu, Li Xilu. Realization of simulated star map with noise [J]. *Chinese Optics*, 2014, 4(4): 581-587. (in Chinese)
支帅, 张刘, 李欣璐. 带噪声模拟仿真星图的实现[J]. 中国光学, 2014, 4(4): 581-587.
- [10] Li Jie, Guo Pan, Wang Chunzhe. Application of shearlet transform in the star extraction [J]. *Chinese Optics*, 2015, 3(3): 386-393. (in Chinese)
李杰, 郭盼, 王春哲. 剪切波变换在星点提取中的应用[J]. 中国光学, 2015, 3(3): 386-393.
- [11] 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. (in Chinese)
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.
- [12] Tang Shengjin, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa. 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. 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.
- [13] Wei Wei, Liu Enhai. Preprocessing of infrared star map and position accuracy analysis of star point [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 991-996. (in Chinese)
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.