

基于非下采样 Contourlet 变换和映射最小二乘支持向量机的高精度星点定位方法

刘南南^{1,2} 徐抒岩¹ 胡 君¹ 王 栋¹ 曹小涛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 为解决巡天相机稳像控制精跟踪级系统高精度的光闭环问题, 提出一种基于非下采样 Contourlet 变换 (NSCT) 去噪预处理和映射最小二乘支持向量机 (MLSSVM) 回归校正的星点定位方法。针对星图特点, 采用自适应的基于 NSCT 的去噪方法来减小随机误差。从频域角度分析平方质心法系统误差产生的机理, 得到其近似解析表达式; 利用蒙特卡罗数值仿真的方法, 用带有高斯径向基函数 (RBF) 核的映射 MISSVM 进行回归分析, 得到星点质心的理想位置和系统误差的非线性函数关系, 并用它进行系统误差的校正。仿真实验结果表明, 提出的方法抗噪能力更强, 星点定位精度提高 1~2 个数量级, 具有更为优越的星点定位性能。

关键词 光计算; 光学测量; 非下采样 Contourlet 变换; 映射最小二乘支持向量机; 星点定位; 误差分析

中图分类号 TP319 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0512001

Hyper Accuracy Star Location Algorithm Based on Nonsampled Contourlet Transform and Mapped Least Squares Support Vector Machine

Liu Nannan^{1,2} Xu Shuyan¹ Hu Jun¹ Wang Dong¹ Cao Xiaotao¹

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

Abstract In order to resolve the problem of light closed loop for the level of fine tracking system of survey camera high-precision image stabilization control, a star location method is proposed based on nonsampled contourlet transform (NSCT) and mapped least squares support vector machine (MLSSVM). Aiming at the characteristics of the star image, the image is denoised by adaptive NSCT. By analyzing the systematic errors of square centroid method in the frequency domain, its approximate analytic expression is obtained. By using Monte-Carlo numerical simulation method, regression analysis based on MLSSVM with radial basis function (RBF) kernel is proposed. The nonlinear function between the ideal star centroid location and the systematic errors is obtained, and is used to correct the systematic errors. Simulation results show that the proposed method is stronger in anti-noise performance and the star location accuracy is improved by 1 to 2 order of magnitude.

Key words optics in computing; optical measurement; nonsampled contourlet transform; mapped least squares support vector machine; star location; error analysis

OCIS codes 100.2000; 120.4820; 150.1135; 150.0155

1 引 言

随着空间科学探索的发展, 可利用空间站大光学平台摆脱大气影响、低天光背景和便于维护升级的得天独厚的天文观测条件, 开展科学上极具挑战

性的高空间分辨本领、光学近紫外和近红外波段深度成像与光谱巡天的工作。大口径的空间巡天相机在对目标成像的过程中, 由于大光学平台受到外部扰动, 将会造成主光学系统的视轴和目标的偏离, 从

收稿日期: 2012-09-20; **收到修改稿日期**: 2012-11-02

基金项目: 吉林省科技发展计划项目基金(20090311)和中国科学院领域前沿创新项目基金(201204)资助课题。

作者简介: 刘南南(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事高精度导航星技术方面的研究。E-mail: lnn226@163.com

导师简介: 徐抒岩(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学成像电子技术方面的研究。

E-mail: xusy@ciomp.ac.cn

而导致成像质量的下降。因此,高精度的稳像控制是对天文目标精密观测实现的关键。巡天相机是一个大口径、大惯量的系统,由此决定了其机械谐振频率难以提高,从而限制了控制系统带宽的扩展。因此,采用单级控制方案难以达到高精度的控制要求。

稳像控制系统采用由粗跟踪和精跟踪两级组成的双检测型复合轴控制方案。粗跟踪级采用星敏传感器作为位置传感器,星敏传感器的测量精度在角秒级可以满足性能要求^[1]。精跟踪级采用光闭环的方式,要求传感器的测量精度极高,为 $0.01''$ 。这就迫切需要高精度的导航星传感器为精跟踪级系统闭环。高精度的导航星传感器利用巡天相机的主光学系统,使导航星占据一小部分的主光学视场。由于主光学系统的焦距比较长,为 28 m ,探测器的像元角分辨率比星敏传感器高 $1\sim 2$ 个数量级。但是,导航星传感器占据的视场比较小,要求视场内有足够多的导航星,则可探测的星等比较高。星等高,星光照度低,探测器拍摄的星图的信噪比低,难以提高最终的星点定位精度。因此,需要采用一种去噪方法对星图进行预处理,以提高星图像的信噪比。图像去噪的方法很多,归纳起来可分为两大类,即空间域和变换域。目前基于变换域的小波分析方法由于其性能的优越性被广泛采用。但是,小波分析方法不能有效处理具有线奇异性的信号,在图像处理中的应用具有一定的局限性^[2]。Do等^[3]于2002年提出了Contourlets变换,它不仅具有良好的多尺度特性和时频局部特性,还具有多方向特性。在Contourlets变换的基础上,Cunha等^[4]提出了非下采样Contourlet变换(NSCT),该变换取消了图像分解和重构的上采样和下采样的过程,因此具有平移不变性。因此,本文采用自适应的非下采样Contourlet变换去噪方法。

传统上,星点定位采用质心算法,由于其算法的简便性和稳健性,被广泛应用于点目标定位当中^[5]。但是,质心法测量精度受到边缘像素的影响较大,为了更好地利用信噪比较高的中间像素部分,本文采用平方质心法来计算星点的中心位置。平方质心星点定位算法,由于其固有的性质,用星点的几何中心代替亮度中心,会产生系统误差。近年来出现多篇质心法误差分析和系统误差补偿的文献,贾辉等^[6]用系统误差的近似解析表达式对系统误差进行补偿,由于解析表达式本身存在误差,补偿后的精度不会很高。杨君等^[7]采用最小二乘支持拟合法来估计质心位置,拟合的精度较低。Vapnik^[8]于1995年

最早提出了支持向量机技术,它是基于结构化的风险最小化原理的统计学习理论,比基于经验的风险最小化原理的神经网络在性能上有很大提高。向量机技术被广泛用于分类和回归问题中,尤其在解决输入和输出是非线性关系的问题时,它是一个良好的工具。Suykens等^[9]于1999年提出了最小二乘支持向量机的理论,它将支持向量机的不等式约束转化为等式约束,将误差平方和损失函数作为训练集的经验损失,把解凸二次规划问题转化为解线性方程组问题,提高了训练速度和收敛精度,同时降低了内存需求。基于以上分析,本文在频域角度分析系统误差产生的机理,利用蒙特卡罗数值仿真的方法,用带有高斯径向基函数核的映射最小二乘支持向量机进行回归分析,得到星点质心的理想位置和系统误差的非线性函数关系,并用此函数关系对质心估计值进行后校正。

2 平方质心算法误差分析

2.1 总误差合成

当星点目标成像在一个像元上时,质心精度为一个像元的分辨力。本系统像元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$,焦距为 28 m ,得到的像元分辨力为 $0.075''$,不满足性能指标要求。如果要实现亚像元的质心精度,需要探测器离焦放置,使星点成像在探测器的多个像元上。采用平方质心法计算星点质心位置,平方质心法的计算公式为^[10]

$$\hat{x}_c = \frac{\iint_W x I^2(x, y) dx dy}{\iint_W I^2(x, y) dx dy}, \quad (1)$$

$$\hat{y}_c = \frac{\iint_W y I^2(x, y) dx dy}{\iint_W I^2(x, y) dx dy}, \quad (2)$$

式中 (\hat{x}_c, \hat{y}_c) 是理想星点质心坐标的估计值, W 为质心计算的采样窗口, (x, y) 为像素的坐标, $I(x, y)$ 为像素的亮度值。由于星点图像是取样量化后的值,所以将(1)、(2)式离散化后为

$$\hat{x}_g = \frac{\sum_{i=1}^n x_i I_i^2}{\sum_{i=1}^n I_i^2}, \quad (3)$$

$$\hat{y}_g = \frac{\sum_{i=1}^n y_i I_i^2}{\sum_{i=1}^n I_i^2}, \quad (4)$$

式中 n 为用于质心计算的像素个数, (\hat{x}_g, \hat{y}_g) 是实际星点质心坐标的估计值, (x_i, y_i) 为像素的几何中心, I_i 为光亮度在像素内的积分。由于 x, y 是对称的, 下面只对 x 方向的误差进行分析。平方质心法的误差如下式所示:

$$\sigma_{x_g} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial \hat{x}_g}{\partial I_i} \right)^2 \sigma_i^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_g}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_x^2 \right]}, \quad (5)$$

式中 σ_{x_g} 是实际星点质心坐标的估计值的标准差, σ_i 为平方质心算法的随机误差, 它是由探测器的暗电流噪声、光子散粒噪声、非均匀性噪声、固定模式噪声、热噪声、复位噪声和读出噪声造成的^[11], 而 σ_x 为平方质心算法的系统误差, 它是由于(3)式中用像素的几何中心代替像素的亮度中心造成的^[12]。从(5)式可以看出, 平方质心算法的总误差由随机误差和系统误差两个方面合成的, 前者可通过去噪和提高信噪比的方法来解决; 后者可采用对系统误差和理想质心位置的关系进行回归分析, 并利用对其进行后校正的方法来消除, 以提高测量精度。

2.2 系统误差的频域分析

当采用平方质心法计算星点位置时, 用星点的几何中心代替亮度中心, 会产生逼近误差。下面从频域的角度推导系统误差与理想星点的位置之间的函数关系。当光信号投射到探测器上, 得到离散化的光强信号, 只考虑 x 方向, 此信号的一维形式为

$$g(x) = f(x) \otimes p(x)t(x), \quad (6)$$

式中 \otimes 为卷积运算, $f(x)$ 为连续的光强信号, 由于采用平方质心法, 这里取光强的平方。 $p(x)$ 为探测器的探测灵敏度函数, 假设探测器的填充因子为 100%, $p(x)$ 为矩形函数, $t(x)$ 为采样函数, 其采样频率是相邻两像素之间距离的倒数。 $f(x)$ 、 $p(x)$ 和 $t(x)$ 的函数表达式为

$$f(x) = I^2(x), \quad (7)$$

$$p(x) = \text{rect}(x), \quad (8)$$

$$t(x) = \text{comb}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - kT), \quad (9)$$

式中 T 为像素间距, 对离散化的光强信号 $g(x)$ 进行傅里叶变换, 可得

$$G(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-2\pi j\Omega x) dx. \quad (10)$$

式中 Ω 表示光信号频率, 对(10)式求导数, 可得

$$G'(\Omega) = -2\pi j \int_{-\infty}^{\infty} xg(x) \exp(-2\pi j\Omega x) dx. \quad (11)$$

所以, 考虑一维情况下, 将(10)式和(11)式代入平方质心坐标公式中, 可得

$$\hat{x}_g = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} xI^2(x) \otimes p(x)t(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} I^2(x) \otimes p(x)t(x) dx} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} xg(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx} = -\frac{G'(\Omega)}{2\pi jG(\Omega)}. \quad (12)$$

由于恒星对于地球的张角很小, 可以看作点光源, 其点扩展函数可有由高斯函数来近似^[1]。其一维形式为

$$I(x) = \frac{I_0}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right], \quad (13)$$

式中 x_0 为理想的星点位置, σ_{PSF} 为高斯点扩展函数半径。引入一个辅助函数 $f_e(x)$, 它的表达式为

$$f_e(x) = I^2(x+x_0) \otimes p(x) = \frac{I_0^2}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_{\text{PSF}}^2}\right) \otimes \text{rect}(x). \quad (14)$$

对其进行傅里叶变换得

$$F_e(\Omega) = \frac{I_0^2}{2\sqrt{\pi}\sigma_{\text{PSF}}} \exp[-(\pi\sigma_{\text{PSF}}\Omega)^2] \frac{\sin(\pi\Omega)}{\pi\Omega}. \quad (15)$$

那么, 连续光强信号 $f(x)$ 的傅里叶变换可表示为

$$F(\Omega) = \exp(-2\pi jx_0\Omega) F_e(\Omega). \quad (16)$$

由采样理论, 空域采样相当于在频域周期延拓, 所以, 离散光强信号 $g(x)$ 的傅里叶变换又可以表示为

$$G(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\Omega - n/T) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[-2\pi jx_0(\Omega - n/T)] F_e(\Omega - n/T). \quad (17)$$

对其求导, 可得

$$G'(\Omega) = -2\pi jx_0G(\Omega) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[-2\pi jx_0(\Omega - n/T)] F_e'(\Omega - n/T). \quad (18)$$

因此, 将(12)、(17)、(18)式代入系统误差项中, 可得平方质心法的系统误差项为

$$\sigma(x_0) = \hat{x}_g - x_0 = -\frac{G'(\Omega)}{2\pi jG(\Omega)} - x_0 = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} F_e'(n/T) \sin(2\pi x_0 n/T)}{\pi \left[F_e(0) + \sum_{n=1}^{\infty} 2\cos(2\pi x_0 n/T) F_e(n/T) \right]} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2\sigma_{\text{PSF}}^2) \sin(2\pi n x_0) / n. \quad (19)$$

由于当 $\sigma_{\text{PSF}} > 1$ 时, $\exp(-\sigma_{\text{PSF}}^2) \gg \exp(-n^2\sigma_{\text{PSF}}^2)$, ($n > 1$), (19)式可进一步化简为

$$\sigma(x_0) = \frac{2}{\pi} \exp(-\sigma_{\text{PSF}}^2) \sin(2\pi x_0). \quad (20)$$

从(20)式可以看出,平方质心法的系统误差和理想质心是近似正弦的关系,而且点扩展函数半径越大,系统误差的幅值越小。但点扩展函数半径越大,保证足够能量用于质心计算窗口会越大,使其信噪比降低,不利于质心定位。因此,不能通过增加点扩展函数半径的方法来减小系统误差。当 σ_{PSF} 取 1.5 pixel时, $\sigma(x_0)$ 的最大值接近 0.08 pixel,在本系统中,像元的角分辨力为 0.075",0.08pixel 的系统误差对应于 0.006",它已经大到足够影响导航星系统的测量精度。所以,有必要采用校正算法来减小这个系统误差。

3 减小误差原理

3.1 非下采样 Contourlet 变换去噪原理

星点图像中的各种噪声属于随机误差。有用的星点目标是图像中平滑的低频信号分量,而图像中的噪声是高频信号分量。NSCT 可使图像由空间域转换为变换域,NSCT 由非下采样塔式分解(NSP)和非下采样方向滤波器组(NSDFB)构成,其实现结构如图 1 所示。变换域中的系数表示原图像中不同的尺度和方向下的信号分量。NSCT 的灵活性在于它允许在每个尺度下在 2 的任意整数幂方向上进行分解^[4]。对低频子带重复上述过程,可实现图像的多分辨率、多方向分解。三层的 NSCT 实现结构如图 2 所示。由于 NSCT 分解过程中没有采样环节,不会有频谱混叠现象产生。由于 NSCT 具有平移不变性和方向选择灵活性的优点,将其应用于星点图像去噪可望得到较好的效果。在变换域中,小的系数主要由噪声产生的,而大的系数为有用的星点目标信号。去噪的实质就是采用一定的准则来处理这些系数,再反变换到空间域得到去噪后的图像。

采用软阈值来处理变换后的子带系数。软阈值的表达式为

$$T_{i,j} = \kappa \sigma_n^2 / \sigma_{i,j}, \quad (21)$$

式中 κ 为阈值系数, σ_n 为噪声的标准差, $\sigma_{i,j}$ 为 i 尺度下 j 方向上的系数的标准差。软阈值与硬阈值方法相比有如下优点:首先,软阈值被证明在 Besov 空间上取得了接近最优的最大最小问题的解^[13];其次,软阈值方法比硬阈值方法风险函数值小;最后,由于硬阈值会产生不连续点,用软阈值处理图像效果会更好。因此本文采用软阈值方法对子带系数进行处理。

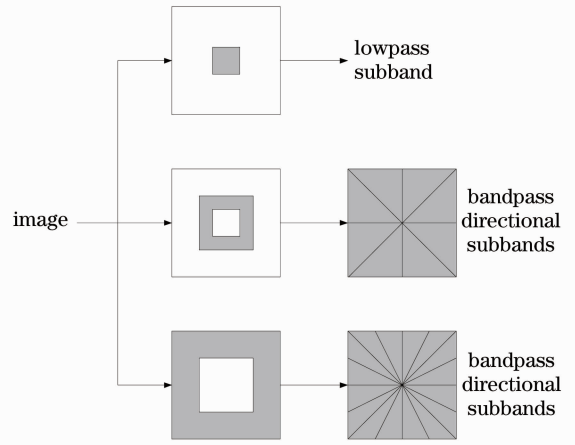


图 1 NSCT 的结构图

Fig. 1 Structure chart of NSCT

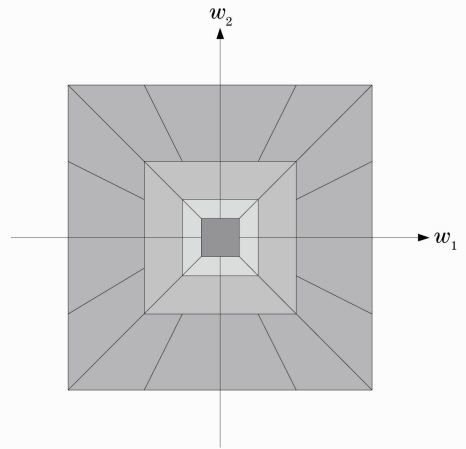


图 2 三层分解的结构图

Fig. 2 Structure chart of three-level decomposition

星点图像去噪的工作流程简要概括如下:

- 1) 对星点图像进行非下采样 Contourlet 变换;
- 2) 计算星点图像的噪声方差;
- 3) 计算变换后各尺度各方向上系数的标准差;
- 4) 确定软阈值,并处理各系数。软阈值函数如下:

$$y = \begin{cases} \text{sgn}(x)(|x| - T), & |x| \geq T \\ 0, & |x| < T \end{cases}; \quad (22)$$

- 5) 进行非下采样 Contourlet 逆变换;
- 6) 得到去噪后星点图像。

3.2 映射最小二乘支持向量机回归校正原理

映射最小二乘支持向量机的函数回归数学模型即求解最优化问题:

$$\min \mathcal{R}(\mathbf{w}, b, \xi) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N \xi_i^2, \quad (23)$$

$$\text{s. t. } y_i = \mathbf{w}^T \phi(x_i) + b + \xi_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

式中 $\mathcal{R}(\mathbf{w}, b, \xi)$ 为风险函数, \mathbf{w} 为权值矢量, γ 为惩罚

参数, ξ 为松弛因子, N 为训练样本的个数, $\phi(\mathbf{x})$ 为映射函数, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N]^T$, b 是偏置量。这个最优化问题的拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{w}, b, \xi, \alpha) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N \xi_i^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i [\mathbf{w}^T \phi(x_i) + b + \xi_i - y_i], \quad i = 1, \dots, N \quad (25)$$

式中 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_N]^T$, α_i 为拉格朗日乘子。最优化条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\mathbf{w}, b, \xi, \alpha)}{\partial \mathbf{w}} = 0 \Rightarrow \mathbf{w}_i = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \phi(x_i), \quad i = 1, \dots, N \\ \frac{\partial L(\mathbf{w}, b, \xi, \alpha)}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \\ \frac{\partial L(\mathbf{w}, b, \xi, \alpha)}{\partial \xi} = 0 \Rightarrow \alpha_i = \gamma \xi_i, \quad i = 1, \dots, N \\ \frac{\partial L(\mathbf{w}, b, \xi, \alpha)}{\partial \alpha} = 0 \Rightarrow \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) + b + \xi_i - y_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \end{cases}, \quad (26)$$

消去 \mathbf{w} 和 ξ , 矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}^T \\ \mathbf{I} & (K + \gamma^{-1})\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

式中 $\mathbf{I} = [1, \dots, 1]^T$, $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_N]^T$, $\phi(\mathbf{x})$ 将输入向量由输入空间映射到特征空间, $K = K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \phi(x_j)$, 它是核函数, 需要满足 Mercer 条件。在这里选用高斯径向基函数 (RBF) 作为核函数, 函数表达式为

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2}\right), \quad (28)$$

式中 σ 为核函数参数。映射最小二乘支持向量机模型的输出为

$$f(x) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) + b = \sum_{i=1}^N \alpha_i^* K(x_i, x_j) + b^*, \quad (29)$$

式中 α_i^* 和 b^* 是 (26) 式的最优解。映射最小二乘支持向量机模型用于函数拟合, 在实际中, 不能得到无误差的理想星点位置, 但由 (3) 式和 (4) 式可以得到有误差的星点计算位置, 再通过 (28) 式的映射最小二乘支持向量机模型, 估计出系统误差和无误差的理想星点位置之间的函数关系。系统误差的函数表达式为

$$\sigma(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^* \exp\left[-\frac{(x_i - x_j)^2}{2\sigma^2}\right] + b^*. \quad (30)$$

则星点质心的计算式为

$$x_0 = \hat{x}_g - \sigma(x), \quad (31)$$

式中 $\sigma(x)$ 为系统误差项。

4 实验结果及分析

4.1 模糊星点图像的去噪仿真

为验证提出的可调阈值 NSCT 算法对低信噪比星点图像的去噪能力, 拟采用以下的仿真实验方案。在视场内 (256 pixel \times 256 pixel) 随机生成 2 颗导航星, 它们的光强用高斯点扩展函数来近似。图 3(a) 和图 3(b) 分别为星点目标的源图像和信噪比为 20 dB 噪声图像。图 3(c)~(f) 是对图 3(b) 噪声图像分别用低通平滑滤波、中值滤波、自适应贝叶斯收缩小波和 NSCT 去噪算法进行去噪处理后的结果。小波采用具有 4 阶消失矩的 Daubechies 小波, 对图像进行 4 级分解。非下采样 Contourlet 变换在 3 个尺度下对图像进行分解, 每个尺度下的方向分别为 4, 4, 8, 如图 2 所示。由于星图图像有其自身的特点, 即细节信息不够丰富, 使得变换后各子带系数很小, 所以要通过减小阈值来保留足够多的系数。经实验验证在最细尺度取 $\kappa = 0.7$, 其他两个尺度取 $\kappa = 0.5$ 时去噪效果最好 [κ 为 (21) 式中的阈值系数]。可以看出, 20 dB 低信噪比星点图像经过低通平滑滤波、中值滤波、自适应贝叶斯收缩小波和可调阈值 NSCT 去噪处理后, 信噪比 R_{SN} 分别为 28.28 dB、26.73 dB、30.62 dB、43.61 dB。采用可调阈值 NSCT 对星点图像去噪, 性能要明显好于传统的低通平滑滤波、中值滤波和自适应贝叶斯收缩小波去噪算法。从视觉直观来看, 经过可调阈值 NSCT 去噪处理后的图像与源图像差别极小, 可调

阈值 NSCT 去噪算法对噪声抑制显著,大大提高了图像的信噪比,有利于提高后续的质心计算精度。为了验证可调阈值 NSCT 去噪方法对实际星点图像的噪声抑制能力,用哈勃望远镜拍摄的实际图像

做相同的实验,图 4(a)是信噪比为 22dB 的原图像,图 4(b)~(e)是对图 4(a)图像分别用低通平滑滤波、中值滤波、自适应贝叶斯收缩小波和可调阈值 NSCT 去噪算法进行去噪处理后的结果,去噪后的

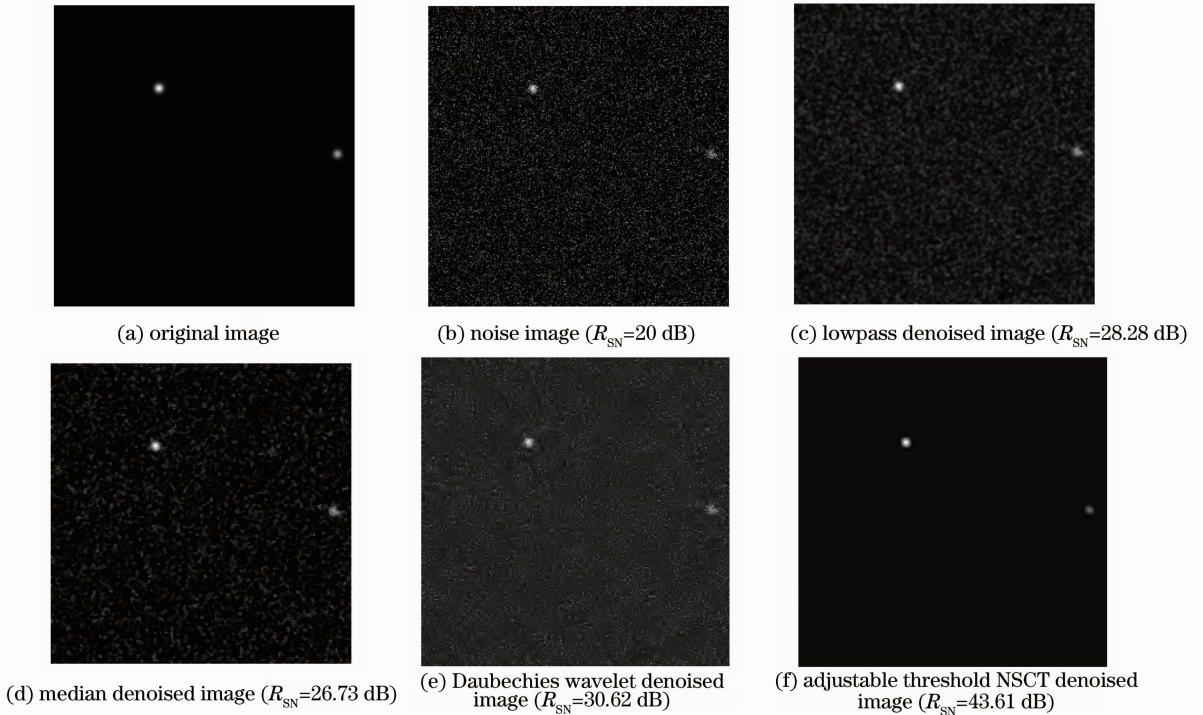


图 3 仿真星图像可调阈值 NSCT 去噪和现有方法对比

Fig. 3 Comparison of adjustable threshold NSCT denoised with existing methods for simulation star image

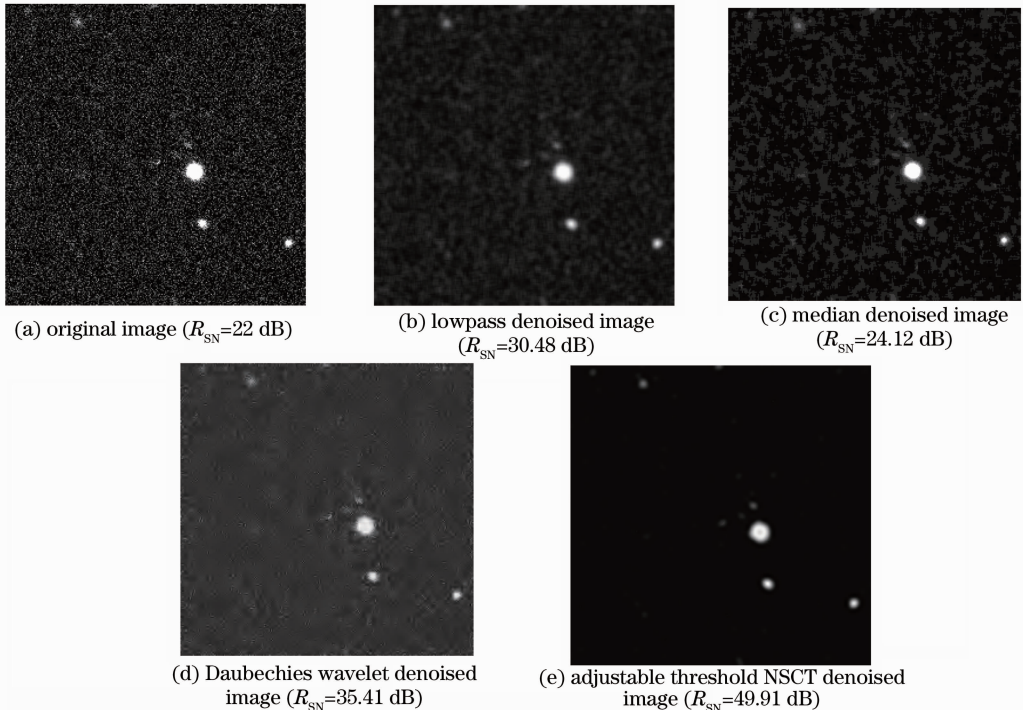


图 4 实际星图像可调阈值 NSCT 去噪和现有方法对比

Fig. 4 Comparison of adjustable threshold NSCT denoised with existing methods for real star image

信噪比分别为 30.46 dB、24.12 dB、35.41 dB、49.91 dB。可以看出,对于实际拍摄的星图,可调阈值的 NSCT 去噪算法相比于其它算法,对噪声也有很强的抑制能力。不可否认的是相比于其他算法,NSCT 计算复杂度较高,信噪比的提高是以牺牲计算速度为代价的。但对于本系统高精度是必需达到的硬性要求,可采用高性能的数字信号处理器(DSP)或 DSP 阵列来实现高速计算,满足实时性的要求。

4.2 回归校正算法仿真

为了验证基于映射最小二乘支持向量机的平方质心系统误差回归校正算法,拟采用以下仿真实验。仿真实验分为三步:1)通过数值仿真得到映射最小二乘支持向量机的训练样本;2)通过 K 组交叉验证的方法,得到模型的最优参数;3)用仿真的星点图像来验证提出的系统误差校正算法的性能。

巡天相机主光学系统焦面用于导航的区域视场角为 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$,可探测星等为 12 等星。在轨情况下,由于系统存在像旋,在视场内需要两颗导航星才能达到稳像的目的。天球内的恒星分布近似服从泊松分布,可以验证在视场内的平均恒星数为 10.8 个,存在两颗导航星的概率为 99.98%。仿真实验的计算质心窗口取为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ ^[5,12],根据詹姆斯韦伯天文望远镜的经验^[14],计算质心的能量占辐射总能量的 80% 以上,高斯光斑的光强分布和能量集中度分别如图 5 和图 6 所示。从图 6 中可以看出,当计算质心窗口取为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 时,高斯点扩展函数的半径为 2 pixel 的能量占 80%。但这是光斑中心在中央像素中心时的情况,当光斑中心不在中央像素中心时,计算质心窗口的总能量小于 80%,为使所有情况下的能量都占 80% 以上,所以实验中点扩展函数的半径取为 1.5 pixel。假设高斯光斑的中心坐标为 (60, 120),由于 x 和 y 方向的对称性,这里只从 x 方向分析。沿 x 的方向将 1 pixel 分为 100 份,仿真的步长为 0.01 pixel,分别把这 100 个点作为理想星点的位置,用平方质心法计算质心坐标,最后得到理想质心位置和平方质心法的系统误差的关系如图 7 所示。从图 7 可以看出,点扩展函数的半径取 1.5 pixel 时,系统误差和理想质心位置满足近似的正弦关系,这也与(20)式推导的结果也是一致的。

映射最小二乘支持向量机的训练样本是由上面提到的将 1 pixel 分成 100 份,得到的 100 个点作为训练样本。然后将这 100 个样本平均分成 5 组,选

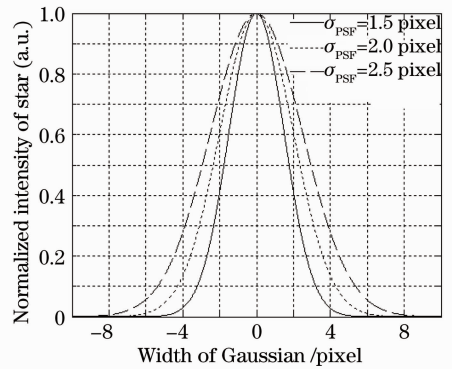


图 5 高斯光斑的光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of the Gaussian facula

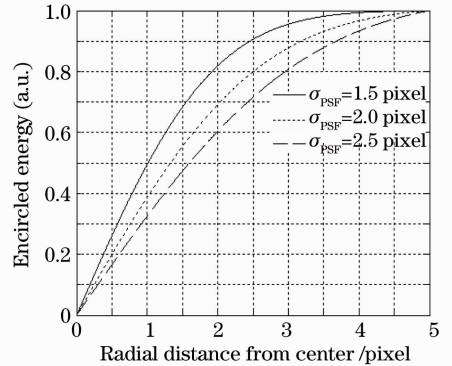


图 6 高斯光斑的能量集中度

Fig. 6 Encircled energy of the Gaussian facula

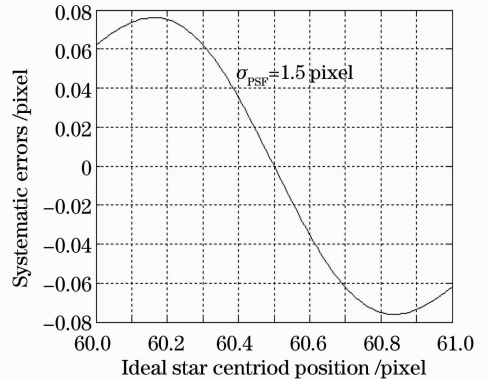


图 7 理想质心位置与系统误差的关系

Fig. 7 Relation between the ideal centroid position and systematic errors

择其中的 4 组作为训练集,剩下的 1 组作为验证集,这样会得到 5 个模型。映射最小二乘支持向量机模型中有 2 个参数需要优化,分别为(30)式中的核函数参数 σ 和(27)式中的惩罚参数 γ 。这两个参数在一定范围内取值,对于这 5 组在这两个参数下验证模型的回归精度,5 组的平均精度作为模型性能评价指标。最终取使得的平均的回归精度最高的 σ 和 γ 作为最优参数,通过实验得到, $\sigma = 1.5, \gamma = 5 \times 10^4$ 为模型的最优参数。在上面得到的 100 个训练样本

中随机取 20 个,对模型进行训练。为对比验证回归拟合精度,用文献[7]的采用分段二次函数的最小二乘支持法对误差进行拟合曲线和拟合误差曲线分别如图 8、9 所示。从图 8、9 可以看出在像素中间和两侧的位置拟合误差较大,最小二乘支持法拟合误差为 5×10^{-3} pixel。映射最小二乘支持向量机进行回归拟合曲线和拟合误差曲线分别如图 10 和图 11 所示。从图 10 可以看出预测数据的模型输出值几乎都在由训练数据所回归拟合的曲线上,模型的回归精度很高。从图 11 中可以看出,映射最小二乘支持向量机模型的最大拟合误差为 5×10^{-4} pixel,拟合精度很好,比最小二乘支持法高 1 个数量级。映射最小二乘支持向量机模型非常适合解决训练样本是多维向量的非线性回归问题,星点定位还存在其他系统误差,如实际探测器的填充因子小于 100% 所产生的系统误差,可以与平方质心法系统误差一起进行校正,映射最小二乘支持向量机回归校正模型可以随着研究的深入进行扩展。采用(31)式对算法的系统误差进行校正后,星点定位的系统误差为模型的拟合误差。

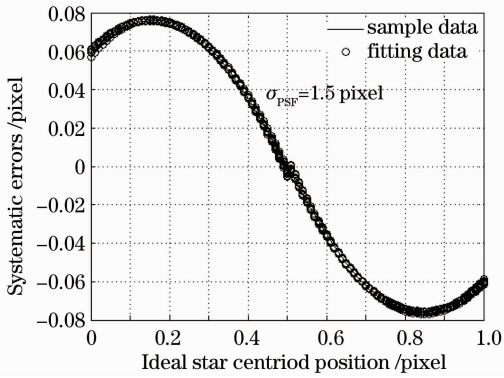


图 8 最小二乘支持法的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of least squares algorithm

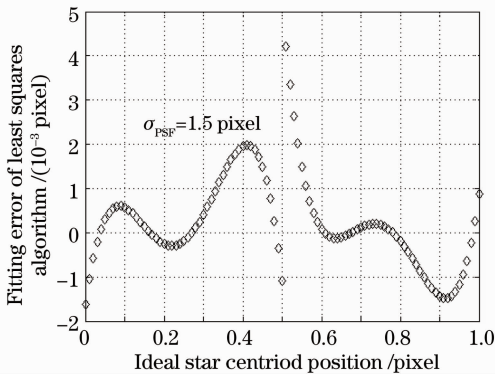


图 9 最小二乘支持法的拟合误差曲线

Fig. 9 Fitting error curve of least squares algorithm

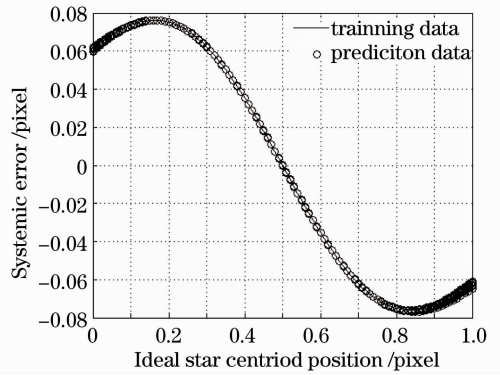


图 10 映射最小二乘支持向量机的回归拟合曲线

Fig. 10 Regression curve of MLSSVM

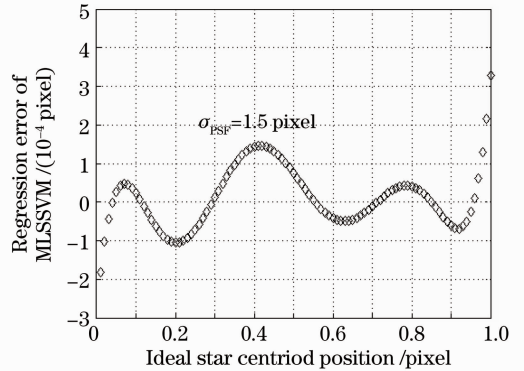


图 11 映射最小二乘支持向量机的拟合误差曲线

Fig. 11 Regression error curve of MLSSVM

4.3 综合实验仿真

为综合分析系统随机噪声和系统误差这两方面的影响,进行以下 2 组对比实验。实验的目标图像是加入高斯随机噪声,图像为信噪比 20 dB 的低信噪比星点图像。第 1 组实验分别利用传统的平方质心法和先用 NSCT 去噪再利用平方质心法计算质心位置,它的总误差曲线分别如图 12 和图 13 所示。比较图 12 和图 13 可以看出,虽然总误差水平没有显著的降低,但 NSCT 去噪后的质心位置误差受到随机噪声影响要小得多,总误差曲线趋于平滑,利于后续的处理。第 2 组实验分别直接利用 MLSSVM 回归校正和先用 NSCT 去噪再利用 MLSSVM 回归校正计算质心位置。比较图 12 和图 14 可以看出,进行 MLSSVM 回归校正的总误差明显降低,定位精度从 0.1 pixel 提高到 0.015 pixel。比较图 14 和图 15 又可以看出,先进行 NSCT 去噪预处理,再进行 MLSSVM 回归校正,定位精度又有进一步的提高,从 0.015 pixel 提高到 3×10^{-3} pixel。从这两组实验可以看出,本文提出的算法性能优越,相比于传统的平方质心定位方法精度提高了 1~2 个数量级。

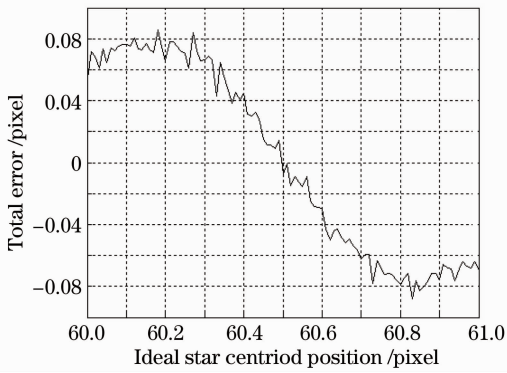


图 12 星点位置总误差曲线

Fig. 12 Total error curve of star location

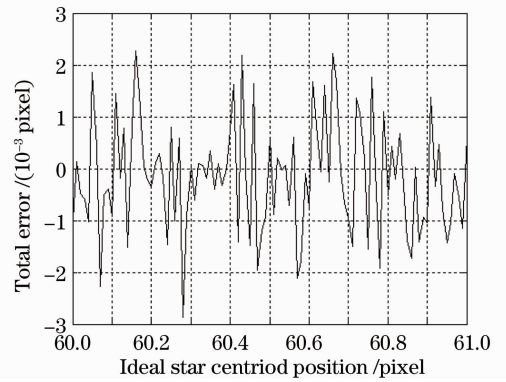


图 15 NSCT 去噪和 MLSSVM 回归校正后总误差曲线

Fig. 15 Total error curve after NSCT denoised and MLSSVM regression calibration

仿真实验表明,基于 NSCT 去噪预处理有效地抑制了噪声;而映射最小二乘支持向量机回归校正有效地消除了平方质心法的系统误差,使其在计算导航星系统总误差时可以忽略。与传统的平方质心定位方法相比,提出的方法抗噪能力更强,星点定位精度提高 1~2 个数量级,具有更为优越的定位性能。

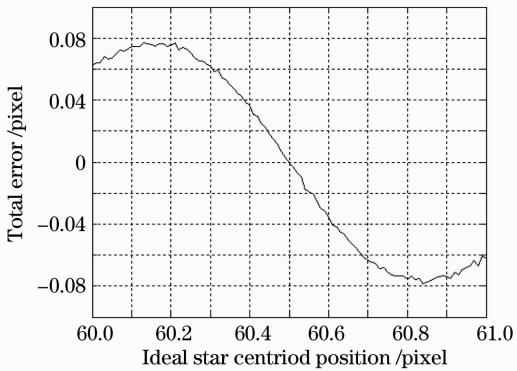


图 13 NSCT 去噪后的星点位置的总误差曲线

Fig. 13 Total error curve of star location after NSCT denoised

参 考 文 献

- 1 C. C. Liebe. Accuracy performance of star trackers —— a tutorial[J]. *IEEE Trans. Aero. Electron. Syst.*, 2002, **38**(2): 587~599
- 2 S. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Process*[M]. San Diego: Academic Press, 1999
- 3 M. N. Do, M. Vetterli. Contourlets: a new directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2002, **11**(1): 497~501
- 4 A. L. da Cunha, J. Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling contourlet transform theory, design, and applications[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 5 Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(9): 812~815
- 6 Jia Hui, Yang Jiankun, Li Xiujian *et al.*. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star tracker[J]. *Science in China: Technological Sciences*, 2011, **41**(1): 69~76
- 7 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
- 8 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
- 9 Vapnik. *The Nature of Statistical Learning Theory*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- 10 J. A. K. Suykens, J. Vandewalle. Least squares support vector machine classifiers[J]. *Neural Processing Letters*, 1999, **9**(3): 293~300
- 11 Li Peng, Gao Limin, Wu Yiming *et al.*. Research on subpixel

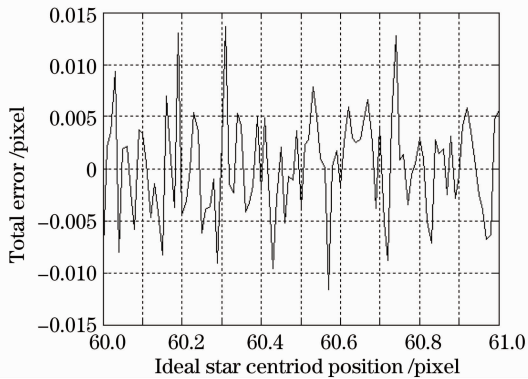


图 14 MLSSVM 回归校正后的星点位置总误差曲线

Fig. 14 Total error curve of star location after MLSSVM regression calibration

5 结 论

提出一种基于 NSCT 去噪预处理和映射最小二乘支持向量机回归校正的星点定位的新方法,可以对低信噪比的星点图像进行星点定位并取得了很好的效果。针对较高星等的星点图像序列进行大量

- location error of weighted centroiding algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, **34**(6): 43~47
- 李 朋, 高立民, 吴易明 等. 加权质心法亚像元定位误差研究[J]. *电子测量技术*, 2011, **34**(6): 43~47
- 11 Liu Jinguo, Li Jie, Hao Zhihang. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 553~557
- 刘金国, 李 杰, 郝志航. APS星敏传感器探测灵敏度研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 553~557
- 12 G. Rufino, D. Accardo. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, **53**(2): 135~147
- 13 Y. Chen, C. Han. Adaptive wavelet threshold for image denoising[J]. *IEEE Trans. Electron. Lett.*, 2005, **41**(10): 586~587
- 14 N. Rowlands, M. B. Vila, C. Evans *et al.*. JWST fine guidance sensor-guiding performance analysis [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 701036

栏目编辑: 张 腾