

文章编号 2095-1531(2016)04-0405-10

# 移位相加法日间探测低信噪比恒星

王昊京<sup>1\*</sup>, 吴量<sup>1,2</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 张世学<sup>1</sup>, 杨轻云<sup>1</sup>

(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:**为实现白天红外光电测量系统对低信噪比恒星的质心及能量高精度计算,本文给出一种高效的方法。首先,分析了红外光学系统白天恒星的成像特征。其次,先对采集的图像序列进行预处理操作得到预处理图像。接着对预处理图像序列执行叠加求均值和下采样操作得到下采样图像。在下采样图像中以亮度为特征求取恒星的疑似位置后,在预处理图像序列上建立与疑似位置相对应的目标区域,在目标区域内顺序求取质心序列。对目标区域的图像序列以质心偏移为基础进行移位相加后获取目标图像。在目标图像上以信噪比为判据完成恒星提取,以及质心和能量的计算。再次,分析指出此方法能增强目标信噪比的原理,并给出其适用范围以及相关参数的确定方法。最后通过实验表明,采用移位相加法可增强目标的信噪比,并提高提取正确率;且对于 SNR 不大于 4.8 的恒星可将其质心和能量计算精度平均提高 0.06 pixel 和 28.5%。移位相加法对低信噪比的恒星可较为精确地计算其质心和能量。

**关键词:**低信噪比;移位相加法;图像叠加;质心提取;能量计算

**中图分类号:**TP394.1; TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20160904.0405

## Low SNR star detection by shift-and-add method in daytime

WANG Hao-jing<sup>1\*</sup>, WU Liang<sup>1,2</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, ZHANG Shi-xue<sup>1</sup>, YANG Qing-yun<sup>1</sup>

(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)

\* Corresponding author, E-mail: wanghaojing@vip.qq.com

**Abstract:** In order to accurately calculate star's centroid and energy in infrared electro-optical measuring system in daytime for low SNR star, an efficient method is presented. Firstly, according to the optical characteristics of electro-optical measuring system, the imaging characteristics of stars during the day are analyzed. Secondly, in order to obtain pre-processing sequence, these operations, which include non-uniformity correction, bad point's correction and background subtraction, are performed orderly in the acquired image sequence. Then a down-sampled image is got by performing image-stacking and down-sampling operation in the pre-processing sequence. Stellar suspected position is obtained by brightness characteristics in the down-sam-

收稿日期:2016-03-24;修订日期:2016-04-28

基金项目:国防科技创新基金资助项目(No. CXJJ-10-M53)

Supported by National Defense Science and Technology Innovation Fund Project(No. CXJJ-10-M53)

pled image, and a target area is located at stellar corresponding suspected position in the pre-processing sequence, then centroid sequence is extracted from the pre-processing sequence inside the target area. The sub images inside target area whose center is at the centroid are shifted and averaged to get a target sub image. Star extraction, centroid extraction and energy calculation are performed in the target image by stellar SNR criterion. Thirdly, the principle of this method to improve target SNR is revealed, its scope of application and the ways to determine the relevant parameters are analyzed. Experimental results indicate that the proposed shift-and-add method can improve target SNR and the extraction accuracy, for stars with SNR less than 4.8, its centroid extraction and energy calculation accuracy are increased by 0.06 pixel and 28.5% in average, respectively. Thus the shift-and-add method can achieve more accurate calculation of centroid and energy for low SNR star.

**Key words:** low SNR; shift-and-add method; image-stacking; centroid extraction; energy calculation

## 1 引言

白天对低信噪比的恒星进行高效探测有较大的现实需求。如在白天对空间目标红外辐射测量实验中,为了得到空间目标红外辐射值,需要对恒星和空间目标进行探测和能量计算,以实现较为精确地系统标校和辐射计算<sup>[1]</sup>。另外,白天高精度的恒星探测可应用于星敏感器的开发,因为高精度的质心信息能为航天器提供准确的空间方位和姿态基准。但白天由于受强烈的太阳辐射影响,恒星和其他空间目标的成像信噪比很低,实现高效提取和高精度能量测量较为困难。在使用红外光电测量系统进行观测时,通常一方面需要采用良好的硬件和光学设计,保证较好成像质量<sup>[2-3]</sup>;另一方面还需要采用较好的目标检测和计算方法<sup>[4-5]</sup>。

在恒星信噪比较低时,依靠单帧图像使用通常的自动局部阈值法难以高效检测到目标,而使用帧差法、多假设检测算法等方法也难以稳定有效的检测到目标。而一种有效的方法是在连续多帧图像内先跟踪目标轨迹,积累目标能量,增强图像信噪比后再检测目标。这类算法通常也称为“检测前跟踪”(TBD)算法。对于先跟踪后检测的方法,曹琦等人提出的基于动态规划红外点目标检测能量累积方法,重点解决小目标的检测概率和速度<sup>[6]</sup>;丛明煜等人提出的改进后的运动目标指示器(MTI)算法,也是基于改进的能量累积

算法,也是重点解决目标侦测提取问题<sup>[7]</sup>;陈尚锋等给出的基于动态规划与轨迹关联的目标实时检测算法可以很好地解决低信噪比条件下的空间点目标提取问题<sup>[8-9]</sup>。这些 TBD 算法一般都采用能量累积的方法检测低信噪比的目标。

但这些 TBD 算法在着重于目标检测的同时却忽视了对目标的质心和能量的精密计算。这造成难以在跟踪过程中对目标获取高精度的质心和能量信息。若不能获得恒星较高精度的能量信息(在本文中能量特指目标的图像灰度值之和),就无法高精度地测量目标的光度、辐射;若无法在跟踪过程中较高精度地计算质心,则就无法进行目标位置的高精度实时测量和准确的能量累计。即对于上述的弱小目标检测和提取方法难以同时兼顾如下3点:在低信噪比的图像中提取到目标;在提取到目标的同时获取高精度的质心和能量信息;在保证上述两点的同时有较好的实时性。

本文针对红外光电测量系统进行白天恒星成像分析,指出其成像的大小、速度以及噪音特性。在此基础上给出了移位相加法提取目标的步骤和方法特性。最后通过实验说明其能在高效检测到慢速移动的低信噪比目标的同时,并能获取高精度的质心和能量信息。

## 2 移位相加法的算法流程

### 2.1 图像的预处理

红外光电测量系统白天对恒星目标成像时,

恒星一般弥散在  $3 \times 3$  窗口内,是点目标。而噪声在图像的分布一般比较均匀,且随机地围绕着噪声的均值上下波动,一般符合高斯分布。在白天时,目标的信噪比低、噪音较大,往往容易被淹没在 CCD 靶面上。红外系统的图像除了具有上述白天成像的一般特点外,还具以下两个典型特点:存在无效像元和图像的非均匀性。需要对图像进行预处理操作。

图像的预处理主要包括无效像元剔除、均匀性校正,可由一般的方法进行处理<sup>[10]</sup>。此过程显然可以提高目标的信噪比及计算的可靠性。

## 2.2 移位相加法提取目标的流程

移位相加法提取点目标并完成高精度质心和能量计算的步骤流程共分为 13 步,对于每幅图像步骤(6)~(13)需循环执行以完成所有恒星点的提取。流程如下:

(1) 读入第  $i$  幅图像并经过坏点剔除和均匀性校正,称为校正图像,记作  $I_i^{\text{ori}}$ ;

(2) 获取预处理图像,记作  $I_i^{\text{DN}}$ :它由校正图像  $I_i^{\text{ori}}$  减去背景图像获得,其中背景图像记作  $I^{\text{M}}$ ,它的每个像素是由  $N$  幅图像上对应像素的均值构成;

(3) 将预处理图像压入循环队列中并求取循环队列的均值图像,此均值图像记作  $I^{\text{ave}}$ ,此队列记为  $I^{\text{DN}} = \{I_{i-n-1}^{\text{DN}}, \dots, I_i^{\text{DN}}\}$ ;

(4) 对均值图像  $I^{\text{ave}}$  进行 1:4 下采样获得下采样图像,记作  $I^{\text{sp}}$ ,并计算  $I^{\text{sp}}$  的均值  $\mu_{\text{sp}}$  和标准差  $\sigma_{\text{sp}}$ ;

(5) 在下采样图像  $I^{\text{sp}}$  寻最亮像素,将其记为  $Pt_m(X_m, Y_m)$ ,其中  $X_m, Y_m$  是位置坐标。以  $Pt_m$  为中心创建  $3 \times 3$  的窗口,记作  $Rc_{33}$ ;此窗口定义了一个疑似恒星的目标区域。为方便起见,将长宽均为  $j$  个像素的窗口记作  $Rc_{jj}$ ;

(6) 通过  $Pt_m$  判断其是否为疑似目标。如果  $Pt_m < k\sigma_{\text{sp}}$  ( $k$  通常选择为 2),则执行步骤(1);否则继续执行后续步骤;

(7) 在预处理图像队列  $I^{\text{DN}}$  中以  $Pt_{m2}(2X_m, 2Y_m)$  为中心创建窗口  $Rc_{77}$ 。取循环序列中任意一幅图像  $I_i^{\text{DN}}$ ,对其上窗口  $Rc_{77}$  内提取的子图求取

质心,记作  $C_i$ 。对循环序列  $I^{\text{DN}}$  中所有图像同样求取质心构成序列,记作  $\{C_{i-n-1}, \dots, C_i\}$ ;

(8) 创建移位子图像序列。对序列  $I^{\text{DN}}$  中图像  $I_i^{\text{DN}}$  对应的质心位置  $C_i$  正确调整参考原点后取整,标记为  $[C_i]$ 。在以  $[C_i]$  为中心的窗口  $Rc_{99}^i$  处建立子图像  $\text{Sub}I_i$ ;对序列中任意图像  $I_{i-1}^{\text{DN}}$ ,同样以其质心点  $[C_{i-1}]$  为中心确定窗口  $Rc_{99}^{i-1}$ ,并相应建立子图像  $\text{Sub}I_{i-1}$ ;对于子图像  $\text{Sub}I_{i-1}$ ,使用线性插值法平移  $C_i - C_{i-1}$  个像素获取平移子图像,标记为  $\text{Sub}I'_{i-1}$ ,如图 2 所示。像素点的映射关系详见 3.4.1 节所述;

(9) 求取均值移位子图像。依次获取平移图像序列  $\{\text{Sub}I'_{n-1}, \dots, \text{Sub}I'_{i-1}\}$ ,算上  $\text{Sub}I_i$  共计  $n$  幅子图,进行叠加求取移位均值子图像  $\text{Sub}I^{\text{ave}}$ ;

(10) 在移位均值子图像  $\text{Sub}I^{\text{ave}}$  中建立目标和背景区域,分别记作 Tg、Bg,估算背景的均值  $\mu_{\text{bg}}$  和标准差  $\sigma_{\text{bg}}$ ,以及目标的质心、能量值和信噪比 SNR;

(11) 目标确认判定。如果 SNR 大于信噪比阈值  $\text{SNR}_t$ ,则记录此目标的质心、SNR、能量值,增加目标提取个数;如果不大于,则继续执行下一步;

(12) 在下采样图像  $I^{\text{sp}}$  中,将以  $Pr_m$  为中心的窗口  $Rc_{33}$  内的像素值设为  $\mu_{\text{sp}}$ ,并增加执行次数;

(13) 如果目标提取个数大于最大个数(记作  $\text{Counts}_{\text{max}}$ )或者执行次数大于最大执行次数(记作  $\text{Iter}_{\text{max}}$ ),则退出循环,完成目标的提取;否则循环执行步骤(5)。经过上述步骤,可以完成图像  $I_i^{\text{ori}}$  中所有恒星的提取以及质心、SNR、能量计算。

流程步骤(3)中,循环队列长度固定为  $n$ ,当第  $i$  幅图像压入其中时,先删除第  $i-n$  幅图像,以保持序列的长度固定和数据处理量的相对稳定。

本方法先通过一系列步骤增强目标的信噪比,突出疑似目标区域,完成目标的粗定位。然后通过计算疑似目标区域信噪比来确认恒星目标。在方法中增加了容错性的设计,可多次尝试提取疑似目标区域,能提取到较低信噪比的目标。下面具体分析其能增强疑似目标信噪比,完成目标粗定位的过程。

## 2.3 目标粗定位

### 2.3.1 信噪比的定义

步骤(10)中目标和背景区域的标记如图1所示,目标区域是中心点为 $[C_i]$ ,半径为2的圆域(包括边界);背景区域是2个像素宽的外环带区域,它与中心窗口 $Rc_{55}$ 有一个2个像素宽的间隔区域(标记为Gap),信噪比<sup>[10]</sup>定义如下:

$$SNR = \frac{GN_{Tg}}{\sqrt{GN_{Tg} + C_{Tg}(GM_{Bg} + n_d + n_e^2)}}, \quad (1)$$

$$N_{Tg} = S_{Tg} - C_{Tg}M_{Bg}, \quad (2)$$

式(1)中, $N_{Tg}$ 代表圆域内所有“净”(已扣除背景像素、噪音像素等影响)目标像素值之和, $N_{Tg}$ 即为目标的能量值,单位为 pixel; $G$ 代表 CCD 的增益,单位为  $e^{-1}/\text{pixel}$ ;  $C_{Tg}$  代表圆域内目标像素的个数; $M_{Bg}$ 代表背景区域内像素的均值,单位为 pixel; $n_d$ 代表每个像素的暗电流值,单位为  $e^{-1}$ ;  $n_e$ 代表每个像素的读出噪音值,单位为  $e^{-1}$ ;式(2)中 $S_{Tg}$ 是圆域内所有像素值之和。

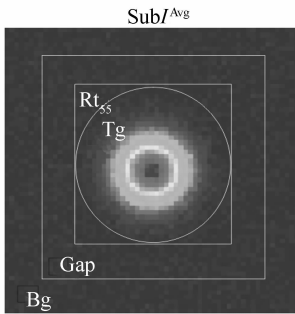


图1 目标和背景区域标记

Fig. 1 Target and background regions' notation

式(1)以在 CCD 上探测到的目标电子数来定义信噪比,而下式为图像处理文献中通常采用的信噪比,其计算更为方便:

$$SNR = \frac{S_{Tg} - C_{Tg}M_{Bg}}{\sigma_{Bg}}. \quad (3)$$

故步骤(10)采用式(3)进行信噪比计算。

### 2.3.2 目标粗定位的信噪比增强分析

步骤(2)中背景图像 $I^M$ 是对背景的估计,减去背景图像可增强目标的信噪比。背景图像可以由红外测量系统对准天空无目标区域事先采集多帧图像计算均值获得。背景图像中的像素值大体上相当于式(1)中 $M_{Bg}$ 。由式(1)可知,减去均值

图像显然可以增强目标的信噪比。若校正图像 $I_i^{Ori}$ 中的任意背景像素符合均值为 $\mu$ 标准差为 $\sigma$ 的高斯分布,即  $\text{pixel}^{Ori} \sim N(\mu, \sigma)$ ,那么预处理图像 $I_i^{DN}$ 中任意背景像素在理想状态下显然满足  $\text{pixel} \sim N(0, \sigma)$ 。但实际上即使减除背景图像,处理过的图像背景仍然有数值残留,其数值不会为0。

步骤(3)中由预处理序列进行叠加求均值可以进一步增强目标的信噪比。此时均值图像 $I^{ave}$ 中的任意背景像素大体满足  $\text{pixel}^{ave} \sim N(0, \sigma/\sqrt{n})$ <sup>[11]</sup>,故若 $n$ 幅图像叠加求均值可以提高信噪比 $\sqrt{n}$ 倍。

本文在步骤(4)中提出采用下采样的方式可进一步增强目标信噪比,突出疑似目标位置。下采样图像 $I^p$ 中任意像素 $P(x, y)$ 由均值图像 $I^{ave}$ 中坐标位置为 $(2x-1, 2y-1)$ 、 $(2x, 2y-1)$ 、 $(2x, 2y)$ 、 $(2x+1, 2y)$ 的4个像素求均值生成。下采样图像 $I^p$ 中的多数像素理想状态下满足  $\text{pixel}^{ave} \sim N(0, \sigma/2\sqrt{n})$ <sup>[11]</sup>,故此步骤增强目标的信噪比约2倍。

由于红外系统的成像特性,在坏已修复的情况下目标一般较背景“闪耀”,图像的像素值越高,越有可能是目标。步骤(5)、(6)采用3-sigma原则粗定位目标,确定疑似目标区域。

## 2.4 移位相加的作用

对疑似目标区域本文提出采用移位相加方法进行计算,这在增强目标的信噪比同时还提高了质心和能量的计算精度,是本文所提方法的另一个关键点。

### 2.4.1 移位子图像的创建

步骤(9)中求取移位子图 $\text{Sub}I_{i-1}$ 的过程如图2所示。它是子图像 $\text{Sub}I_{i-1}$ 平移前后与子图 $\text{Sub}I_i$ 的位置关系。其中图(a)是移位前子图 $\text{Sub}I_{i-1}$ 与子图 $\text{Sub}I_i$ 之间的位置关系,它们的质心在图像坐标系内有一定距离;(b)是两个目标点的质心在平面坐标系内的位置关系,即目标在第 $i$ 帧和第 $i-1$ 帧之间平移距离为:

$$\Delta C = [\Delta C_x \quad \Delta C_y]^T = C_i - C_{i-1}, \quad (4)$$

由(c)可以看出子图 $\text{Sub}I_{i-1}$ 经过平移基本上和子图 $\text{Sub}I_i$ 的质心相重合。移位子图上任意像

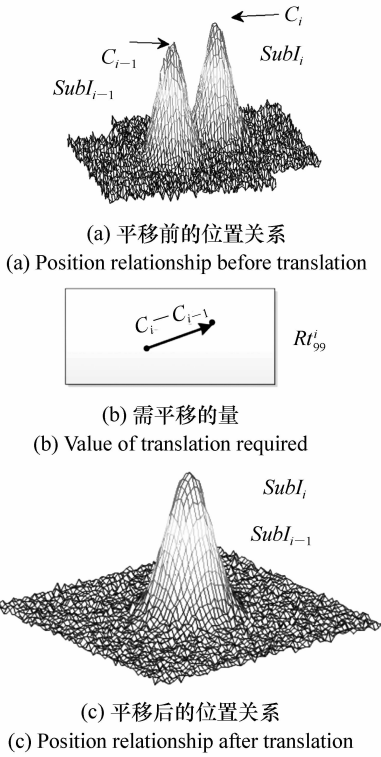


图2 子图像  $SubI_{i-1}$  平移前后与子图  $SubI_i$  的位置关系  
 Fig. 2 Position relationship between before and after translation

素  $SubI'_{i-1}(x,y)$  与子图  $SubI_{i-1}$  上位置为  $(x - C_x, y - \Delta C_y)$  像素相关,是由它周边的4个像素双线性插值得到的。理想情况下经过平移之后,恒星在  $SubI'_{i-1}$  上质心与  $SubI_i$  上的质心相重合。

经过步骤(9)的平移操作,理想状态下  $n$  幅子图像中同一目标的质心都被平移至第  $i$  帧的质心位置处。将平移子图像序列相加求均值获得移位均值子图像  $SubI^{ave}$ 。在  $SubI^{ave}$  上使用质心加权法求取质心、通过式(2)、(3)求取能量和信噪比。

### 2.4.2 增强信噪比的缘由

$SubI^{ave}$  的求取过程是通过多帧叠加法提高目标信噪比的过程。子图像  $SubI^{ave}$  中任意背景像素在理想状态下大体满足高斯分布  $N(0, \sigma/\sqrt{n})$ ,即理论上可提高信噪比为之前的  $\sqrt{n}$  倍。

但实际上信噪比不可能提升到  $\sqrt{n}$  倍。其原因在于质心  $C_i$  和  $C_{i-1}$  与理论质心存在误差,故式(4)中平移量  $\Delta C$  存在误差,不能保证移位后子图像质心准确对准。另一方面,也意味着信噪比的

提升并非随着  $n$  单调递增的。更重要的是  $n$  的增加意味着数据处理量的增加和实时性的降低, $n$  的取值需要在信噪比提升和实时性之间做出平衡。

移位相加可以较好地去除噪音,利于保持恒星的二维高斯形状。在信噪比增强后的子图像  $SubI^{ave}$  求取的质心和能量相当于多帧的优化估计,显然精度更高。

## 2.5 方法健壮性设计

步骤(5)、(6)采用 3-sigma 原则粗定位目标,确定疑似目标区域。此时粗定位的目标中有些可能是虚假恒星点,它们需要被进一步排除;而有些亮度稍低的像素点有可能是恒星点。故本文增加了步骤(13),当目标提取个数大于设定的最大个数时或者执行次数大于最大执行次数时,才退出目标提取的过程。

步骤(13)的目标提取最大个数  $Couts_{max}$  是图像上最多能提取到的恒星数。此数值可以据系统的视场大小和极限探测能力提前得出。最大执行次数  $Iter_{max}$  可以让上述方法具有多次尝试提取孤立亮点能力。这就可以提高方法的健壮性和容错性,并可以提高低信噪比目标的检测正确率。

这两个阈值是退出恒星提取循环的重要参数。对于一般图像而言,  $Iter_{max}$  可以设置为 10。最后,通过信噪比判断确认目标后,进行精确地质心和能量计算。

## 2.6 其他相关参数的确定方法

在长度为  $n$  的图像序列  $I^{DN}$  中,若以  $m\sqrt{2}/n$  pixel/frame 的速度移动,则以  $1:m^2$  进行下采样,可以把  $m \times m$  的方形区域内所有像素相加生成一个“超级”像素,以突出疑似目标点。但下采样因子  $m$  应该和目标的尺寸大体相当,否则就会降低真实目标点的信噪比,起不到突出疑似目标点的作用。故序列长度  $n$ 、下采样因子  $m$  固定时,目标移动速度不能大于  $m\sqrt{2}/n$  pixel/frame。

步骤(6)中因子  $k$  的通常选取 1.5 ~ 3 之间的数。如果选择 3,则有较大概率排除信噪比低于 3 的目标;如果小于 1.5,则有更多的疑似目标加入循环判断中,不利于实时处理,故  $k$  一般取 2。

对于恒星而言,一般下采样因子取 2 或者 3。

由于目前多数红外 CCD 相机的分辨率为  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 、 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  等偶数尺寸,取 3 不方便处理,故选择 2。

另外,由 3.4.2 节中的分析可知循环序列的长度  $n$  不适宜取的太大,一方面无法保证信噪比单调递增,另一方面会降低实时性。若恒星实际的移动速度为  $v \text{ pixle/frame}$ ,则  $n$  的取值应满足下式:

$$n \geq \frac{m\sqrt{2}}{v}, \quad (5)$$

若恒星以  $1 \text{ pixel/frame}$  的速度移动,则  $n$  一般取  $5 \sim 10$ ,可提升目标信噪比  $2.2 \sim 3.1$  倍。

若步骤(11)中的信噪比阈值  $\text{SNR}_t$  取为 1,取 5 幅图像叠加时,理想状况下可以提取理论信噪比为 0.45 以上的恒星目标。

### 3 测试实验与结果

#### 3.1 仿真实验验证

本文采用 VS2012 使用 C++ 设计程序进行仿真分析。电脑配置如下:CPU 采用 Intel Core 2 Quad Q9400,4G 内存;设计中使用 Intel 的 TBB 库和 IPP 库优化程序的性能以提高处理速度。

恒星为点目标光源,焦面上星点为光学系统的点扩展函数。光学系统并非理想,星的能量分布近似为二维高斯分布:

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (6)$$

式中,  $I_0$  是和星等相关的数值;而  $x_0, y_0$  是星像在星图中精确质心位置的  $x, y$  分量。模拟星点时取  $\sigma=0.6$  时,  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  像元内的能量占到星点总能量的 95% 以上,所以在计算星点质心位置时,取以星点最亮像元为中心的  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  窗口区域进行计算即可,采用常用的质心加权法,公式如下:

$$x = \frac{\sum x_{ij} p_{ij}^2}{\sum p_{ij}^2}, \quad y = \frac{\sum y_{ij} p_{ij}^2}{\sum p_{ij}^2}, \quad (7)$$

式中,  $(x_{ij}, y_{ij})$  是星点像素的位置,  $p_{ij}$  此点的像素值。

#### 3.1.1 仿真过程

仿真实验中,在分辨率为  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的图像上生成一排由亮到暗渐变的 13 颗星点,如图 3。背景符合高斯分布  $N(14, 13)$ , 星点的信噪比变化范围为  $[0.6185, 4.8915]$  之间,信噪比间隔为 0.3561。每帧图像中每颗星点质心在  $x, y$  方向上的移动速度均为  $0.18 \text{ pixel/frame}$ ,即速度大小为  $0.255 \text{ pixel/frame}$ 。



图3 仿真生成的不同信噪比星点

Fig. 3 Different SNR star points produced by simulation

信噪比阈值取 1,当每 5 幅图像进行移位相加时,理想状况下可以提取到理论信噪比为 0.45 以上的恒星,且数据处理帧数最少实时性最好。仿真生成 1 000 幅图像序列,头 4 幅图像舍弃,则每个星点均可获取 996 个质心、信噪比、能量数值的样本。

仿真实验中每颗恒星都有理论质心、能量、信噪比,将提取的结果与理论数值进行对比分析。共进行两个仿真实验,一个是使用移位相加法求取的,另一个是在原图上直接求取的。

#### 3.1.2 仿真结果

仿真结果如表 1 和表 2 所示,表 1 是使用移位相加法在移位均值子图像  $\text{Sub}I^{\text{ave}}$  中求取的;表 2 是直接预处理过的图像  $I_i^{\text{DN}}$  中求取的。

在表 1 和表 2 中,第一列是恒星的理论信噪比,标记为 SNR。第三列是实际提取的信噪比的均值,它是信噪比的估计,记作  $\text{SNR}'$ 。对于表 1,此信噪比均值是在移位均值图像中求取的;对于表 2,它是在预处理后的图像  $I_i^{\text{DN}}$  中计算得到的。第二列是仿真过程中每个星点被成功提取的百分比,称作提取率。在处理中对于每颗恒星而言,若

表1 移位相加法的结果

Tab.1 Results obtained with shift-add method

SNR	提取率(均值)/%	SNR'(均值)	质心误差 PtErr(pixel)	能量误差比率 EgErr/%
0.619	28	1.23	0.879	71.50
0.975	88	1.39	0.537	24.90
1.331	99	1.66	0.395	11.90
1.687	100	2.10	0.293	12.10
2.043	100	2.40	0.221	7.30
2.399	100	2.74	0.175	5.10
2.755	100	3.08	0.161	4.00
3.111	100	3.49	0.137	2.50
3.467	100	3.80	0.124	0.30
3.823	100	4.21	0.104	2.00
4.179	100	4.55	0.106	1.60
4.535	100	5.01	0.089	1.70
4.892	100	5.27	0.076	0.40

表2 在预处理过的图像直接求取的结果

Tab.2 Results acquired in the pre-processed images

SNR	提取率(均值)/%	SNR'(均值)	质心误差 PtErr(pixel)	能量误差比率 EgErr/%
0.619	2	1.07	0.971	148.29
0.975	9	1.12	0.664	72.25
1.331	11	1.07	0.523	64.98
1.687	38	1.15	0.369	48.19
2.043	69	1.21	0.295	33.29
2.399	91	1.28	0.254	28.93
2.755	100	1.42	0.201	26.01
3.111	100	1.57	0.162	20.44
3.467	100	1.78	0.150	18.53
3.823	100	1.85	0.122	15.15
4.179	100	2.00	0.113	15.07
4.535	100	2.13	0.103	13.39
4.892	100	2.20	0.089	10.78

SNR' > 1 则意味着被正确提取,将其加入统计样本中。例如,表1中理论信噪比为0.619星点的提取率为28%,这说明它在996次的实验中,有277次被正确提取。第四列是星点的提取质心与理论质心欧式距离的均值,记作PtErr,它说明了质心的提取准确度。第五列是能量误差比率的均值,记作EgErr。能量误差比率定义为:将图像上的恒星点通过式(2)计算得到的能量值与其理论能量值做差求绝对值后,除以理论能量值得到的百分数,其中理论能量值可由式(6)计算得到。能量误差比率反映了能量计算的准确度。

对提取率而言,如表1和表2的第二列所示:移位相加法可以100%提取理论信噪比1.331以上的恒星,而在预处理图像上直接求取时则只能提取理论信噪比2.399之上的恒星目标。另外,若信噪比阈值提升至3,则在预处理图像上几乎完全不能够提取到目标点;而移位相加法则可以提取到理论信噪比为2.755以上目标,共7个目标,占总数的54%。移位相加法的提取率远胜于在预处理图像上直接求取,故移位相加法的提取效果较好。

对比表1的第三列和第一列以及表1和表2

的第三列可以看出:移位相加法显著地增强了目标的信噪比。如图4所示,横坐标是理论信噪比,纵坐标是移位相加法 SNR'与 SNR 的比值,其总体上在 1.1~2 之间,均值为 1.23。说明移位相加法增强了目标的信噪比,是理论信噪比的 1.23 倍。

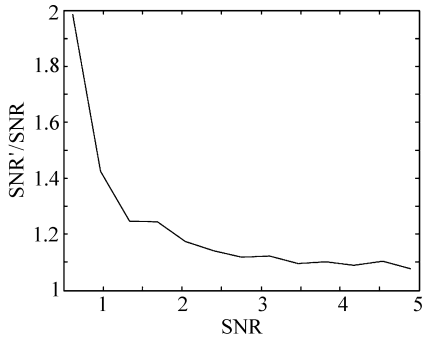


图4 移位相加法信噪比的提升倍数

Fig. 4 SNR improvement by the shift-add method

图5的纵坐标是  $SNR'_1/SNR'_2$ , 它表示:表1与表2中第三列 SNR' 的比值,这可以看出移位相加法较未使用时信噪比平均提升了 1.98 倍,它可增强目标的信噪比。此比值并未达到理论提升倍数  $\sqrt{5}$ , 这与之前的分析是一致的,其原因在于:移位相加法在低信噪比时不能严格保证图像序列质心估计的准确,造成信噪比的提升并未达到理论数值。

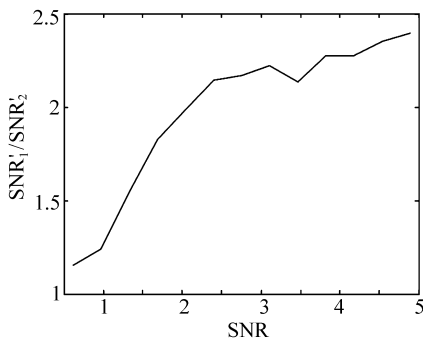


图5 移位相加法与原图上直接求取的 SNR' 的比值

Fig. 5 SNR' ration with the shift-add method and direct method which got SNR' in a preprocessed image

图6反映了移位相加法较未使用时对质心的提升数值,其纵坐标是表2与表1第四列质心的差值。它反映了移位相加法提取精度随理论信噪比逐渐变化的过程。由图表中的数据可以看出:

移位相加法与未使用时相比精度平均提高了 0.055 3 pixel。即移位相加可提升质心提取的精度。

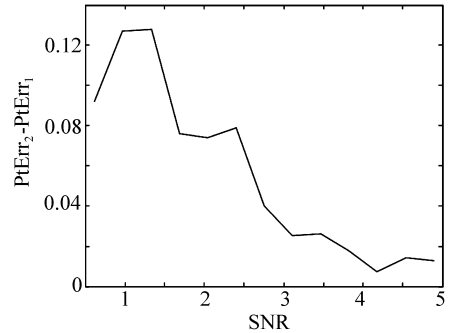


图6 移位相加法质心提高的数值

Fig. 6 Centroid accuracy improved by shift-add method

图7是反映了移位相加法较未使用时对能量精度提升的程度。其纵坐标表1与表2第五列能量误差比率的差值。它反映了移位相加法对能量误差比率的减少程度随理论信噪比的变化趋势。从中可以看出:移位相加法对能量误差比率平均减小了 28.5%,即能量估计精度提升了 28.5%。

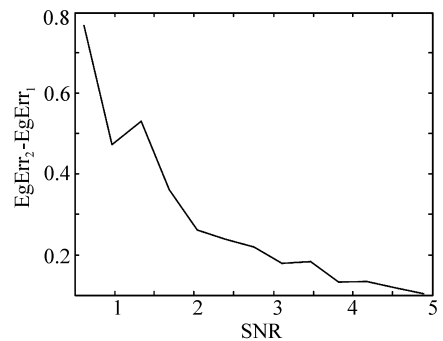


图7 移位相加法对能量误差比率减小的数值

Fig. 7 Energy error ratio reduced by shift-add method

由图6和图7还可以看出:随着理论信噪比的增加,移位相加法对质心计算精度和能量估计精度的提升程度逐渐下降并趋于平稳。其原因在于:随着信噪比的提高在原图上求取质心、能量的精度变高,误差较小,所以移位相加对高信噪比目标的质心、能量计算精度的提升程度也降低。这也说明移位相加法对低信噪比的目标更为有效,十分适合于低信噪比时的目标。

实验中移位相加法每帧的平均处理耗时约为



17 ms,对于帧频为 50 Hz 的相机可以实时处理。

### 3.2 机上实验验证

白天在 1.23 m 口径望远镜平台上使用中波相机对恒星进行验证实验,如图 8 所示。验证实验中恒星目标缺少能量的理论真值,故主要对信噪比、质心进行分析。实验所用的 CCD 分辨率为  $320 \times 256$ ,像元尺寸为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ , $F$  数为  $F4$ 。工作帧频为 50 Hz 时,恒星的移动速度约为  $0.239 \text{ pixel/frame}$ 。有学者认为视场内应该可以观测到很多恒星才对,但实际上由于天光背景、观测波段、视场大小以及 CCD 的性能等诸多限制,根本不可能观测到很多恒星,而且是可观测数量有限。

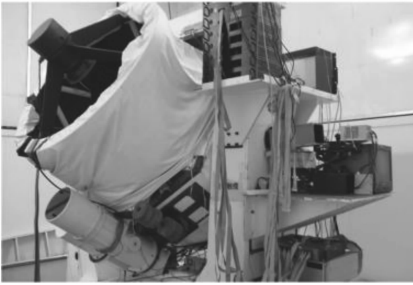


图 8 中波相机放置在 1.23 m 望远镜的轴头上

Fig. 8 MIR camera placed in a 1.23 m telescope axis head

以 50 Hz 的帧频采集高度较为接近、方位尽量相邻的同一块天空区域内 4 颗不同恒星,这样其大气消光较为接近,受太阳影响基本一致。每颗恒星共计采集 1 000 幅,在预处理图像上提取信噪比并计算均值,记作  $\text{SNR}'_2$ ,数值分别为 1.53、1.93、2.10、2.31。若每 5 帧图像进行移位相加生成一个样本(信噪比、质心、能量),则可获取 996 个样本。记移位相加法提取信噪比的均值

表 3 白天移位相加法提取的信噪比结果

Tab. 3 SNR results of the shift-add method in daytime experiment

$\text{SNR}'_2$	提取率(均值)/%	$\text{SNR}'_1$	$\text{SNR}'_1/\text{SNR}'_2$
1.53	100	3.21	2.10
1.93	100	4.27	2.21
2.15	100	4.97	2.31
2.33	100	5.12	2.19

记为  $\text{SNR}'_1$ 。其统计结果如表 3 所示,从中可以看出移位相加法可以增强目标信噪比。

由于质心缺少理论真值,不采用仿真实验中的方式进行分析,而使用其他方式进行分析。对上述 996 个样本每间隔 10 个抽取一个,则可以获取 99 个质心。对于 99 个质心而言,在理论上任意相邻两个质心的间隔应为  $2.39 \text{ pixel/frame}$ 。采用移位相加法求取的实际间隔与 2.39 做差后取绝对值,然后求均值。若均值较小,则可以说明此方法求取的质心数值较为准确。移位相加法求取的均值记作  $\mu_1$ ,在预处理图像中求取的均值记作  $\mu_2$ ,实验结果如表 4 所示。

表 4 质心提取的对比实验结果

Tab. 4 Contrast experiment results of centroid extraction

$\text{SNR}'_1$	$k\mu_2/\text{pixel}$	$\mu_1/\text{pixel}$
3.21	0.157	0.193
4.27	0.112	0.123
4.97	0.094	0.110
5.12	0.081	0.970

由表 4 可以看出,移位相加法的质心提取精度总体上较好。这和仿真实验的结果以及理论分析是一致的。

## 4 结 论

本文针对红外光电测量系统白天恒星成像信噪比较低的特点,分析了恒星成像的移动速度以及噪音特性。在此基础上给出了移位相加法提取恒星目标的方法。它除了采用减除背景、均值相加来增强目标信噪比外,还采用了下采样的方法进一步增强目标信噪比,定位目标区域。在质心求取和能量计算方面,它没有在原图上直接求取,而是对目标区域的子图采用移位后叠加求均值的方式增强目标信噪比,进而准确地提取目标的质心和能量。方法增加了容错性的设计,实现低信噪比恒星目标的准确提取,并提高质心和能量计算精度。最后经实验验证:对移动速度不超过  $1 \text{ pixel/frame}$  的恒星目标其能提高信噪比;即使对信噪比低于 4.8 的恒星目标也能将质心精度平均

提高 0.06 pixel, 能量精度平均提高 28.5% 左右。可能进一步提高质心精度, 下一步的工作是进一步在求取质心时配合线性插值放大等方法, 则有进一步完善方法。

### 参考文献:

- [1] 阴丽梅, 刘骏池, 王建立, 等. 基于红外标准星的红外辐射标校方法[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 98-102.  
YIN L M, LIU J C, WANG J L, *et al.*. Infrared radiation calibration based on infrared calibration stars[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12): 98-102. (in Chinese)
- [2] 续敏, 王建立, 陈涛. 短波红外用于白天卫星探测的研究[J]. 光学技术, 2008, 2(34): 277-280.  
XU M, WANG J L, CHEN T. Study on application of short wave infrared to detecting satellites in the daytime[J]. *Optical Technique*, 2008, 2(34): 277-280. (in Chinese)
- [3] NELSON J E. Infrared methods for daylight acquisition of LEO satellites[D]. Ohio: Department of the Air Force Air University, 2004.
- [4] 王田, 刘伟宁, 孙海江, 等. 基于复杂度和方向梯度的红外弱小目标检测方法[J]. 液晶与显示, 2012(5): 692-696.  
WANG T, LIU W N, SUN H J, *et al.*. Detecting algorithm of infrared small dim targets based on complexity and orientation gradient[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2012(5): 692-696. (in Chinese)
- [5] 穆治亚, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于 NIOS II 的红外弱小目标检测算法实现[J]. 液晶与显示, 2012(6): 814-819.  
MU ZH Y, WEI ZH H, HE X, *et al.*. Design of dim-small target detection on infrared image based on NIOS II[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2012(6): 814-819. (in Chinese)
- [6] 曹琦, 王德江, 张齐, 等. 红外点目标检测中的能量累积[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 741-747.  
CAO Q, WANG D J, ZHANG Q, *et al.*. A method of energy accumulation in infrared point target detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
- [7] 丛明煜, 何文家, 逯力红, 等. 复杂背景成像条件下运动点目标的轨迹提取[J]. 光学精密工程, 2012, 7: 1619-1625.  
CONG M Y, HE W J, LU L H, *et al.*. Trace extraction of moving point targets in complex background images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 07: 1619-1625. (in Chinese)
- [8] 陈尚锋, 肖山竹, 卢焕章. 图像序列弱小目标能量积累检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 2(31): 288-291.  
CHEN SH F, XIAO SH ZH, LU H ZH. Dim small targets detection based on energy accumulation in image series[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 2(31): 288-291. (in Chinese)
- [9] 陈尚锋, 肖山竹, 卢焕章. 一种低信噪比图像序列小目标实时检测算法[J]. 信号处理, 2009, 4(25): 601-606.  
CHEN SH F, XIAO SH ZH, LU H ZH. An algorithm of low SNR small targets real-time detection in imagery[J]. *Signal Processing*, 2009, 4(25): 601-606. (in Chinese)
- [10] 张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 150-155.  
ZHANG X L, LIU Y, WANG J, *et al.*. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 150-155. (in Chinese)
- [11] Photometric. Signal to Noise Ratio: Photometric Whitepaper[EB/OL]. [2014-12-20]. <http://www.photometrics.com/resources/whitepapers/signal-to-noise.php>.
- [12] 高文森, 藩伟. 大学数学—随机数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
GAO W S, FAN W. *University Mathematics—Random Mathematics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)

### 作者简介:



王昊京(1983—), 男, 河南郑州人, 助理研究员, 2007 年于吉林大学获得学士学位, 2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事图像处理、辐射测量、导航等方面的研究。E-mail: wanghaojing@vip.qq.com