

文章编号: 1007-5321(2011)05-0097-04

傅里叶相位差谱在卫星目标图像检测中的应用

张少迪^{1,2}, 王延杰², 孙宏海²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 提出一种利用序列图像傅里叶相位差谱的特征检测卫星目标的算法. 欲跟踪的卫星目标往往淹没在星海之中, 仅仅依据星体特征检测出目标很繁琐, 也很困难. 从傅里叶变换的相谱差异特性出发, 将序列图像相邻 2 帧图像中的前一帧图像通过相谱补偿后与后一帧图像对比, 检测出奇异的卫星目标, 再利用帧差法剔除伪目标, 给出跟踪目标的运动轨迹. 同时, 为了提高该算法的抗噪声能力, 针对遇到的实际情况提出基于二维直方图改进的图像二值化算法. 通过实验验证了该算法的可行性, 结果表明, 所提出算法的检测误差与人工捕获相比不超过 1 个像素.

关键词: 傅里叶相位差谱; 二维直方图; 目标检测

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

Algorithm of Autonomous Satellite Recognition Base on Fourier Phase Difference

ZHANG Shao-di¹, WANG Yan-jie², SUN Hong-hai²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun, Changchun 130033, China)

Abstract: An algorithm is designed to recognize satellites in the sky based on phase difference of a series of images in frequency domain. It is complicated and difficult to recognize the satellites merely through stars' characteristics because the satellites traced are always surrounded by a large number of stars. One frame image in a series of images is compensated and compared with its adjacent frame. From the comparison, the odd object can be recognized by the character of Fourier phase difference. Then frame subtraction method is used to eliminate fake objects. Finally the movement of tracing object is described. Meanwhile an improved algorithm of image binarization based on two-dimension histogram is designed to strength its anti-noise ability. At the end the experiment shows that the error between this algorithm recognition and human capture is less than one pixel.

Key words: Fourier phase difference; two-dimension histogram; object recognition

在经纬仪跟踪卫星的实际问题中, 大量恒星形成的星海会出现在视场中. 在星海中找寻所要跟踪的卫星通常依靠人工捕获. 为了实现经纬仪的智能运行, 希望在经纬仪跟踪卫星之前可以自动检测卫星目标, 本文的算法就是为了解决经纬仪自动检测卫星目标的问题而提出的. 在经纬仪跟踪目标卫星

之前首先按一定的轨迹运动搜寻卫星, 在这个阶段视场中的恒星呈拉线状运动, 且运动轨迹与经纬仪相同. 当卫星出现在视场中时, 由于其运动轨迹与恒星不同, 所以呈现的形状也不同. 传统算法正是依据视场中目标形状的不同区分恒星和卫星的, 但是由于目标众多增加了算法的复杂性. 笔者提出的

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2006AA703405F)

作者简介: 张少迪(1984—), 男, 博士生, E-mail: zhangsd529@yahoo.com.cn; 王延杰(1963—), 男, 研究员, 博士生导师.

算法从整幅图像着手,利用傅里叶相位差谱特性检测出运动轨迹奇异的目标,实现经纬仪无人值守,自动捕获卫星.

1 基于傅里叶相位差谱的目标检测算法

卫星检测可以从两方面着手:一是检测恒星;二是检测卫星.对于前者而言,只要检测出恒星,排除后就是卫星,由于恒星在经纬仪视场中的运动轨迹规律性强,可以通过图像配准的方法实现.但是由于视场中恒星数量众多,逐个匹配较为繁琐,不适合本文提出的问题.而基于傅里叶相位差谱的目标检测算法从检测卫星着手分析整幅图像,大大降低了算法的复杂性,其基本原理如下.

设图像的空域表示为 $f(x, y)$, 其二维傅里叶变换可表示为

$$F(u, v) = \sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} f(x, y) e^{-j\left(\frac{2\pi}{W}ux + \frac{2\pi}{H}vy\right)} \quad (1)$$

其中 W 和 H 分别为图像的宽度和高度.假设另一幅图像是由 $f(x, y)$ 平移得到的,即 $f'(x, y) = f(x + a, y + b)$, 则傅里叶变换的相谱差异特性可表示为

$$\begin{aligned} F'(u, v) &= \sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} f'(x, y) e^{j\left(\frac{2\pi}{W}ux + \frac{2\pi}{H}vy\right)} = \\ &= \sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} f(x + a, y + b) e^{j\left(\frac{2\pi}{W}ux + \frac{2\pi}{H}vy\right)} = \\ &= F(u, v) e^{j\left(\frac{2\pi}{W}ua + \frac{2\pi}{H}vb\right)} \end{aligned}$$

从傅里叶变换的相谱差异特性可知,对于平移变化得到的图像,可以通过相谱补偿转化.在相邻 2 帧图像中,运动轨迹明显有别于其他普通目标而且所占像素较少的目标,本文称为奇异目标.当图像中存在奇异目标时,由于奇异目标的变化规律与其他普通目标不同,相邻 2 帧图像的傅里叶相位差谱不满足傅里叶的相谱差异特性,下面分析奇异目标的存在对傅里叶相位差谱的影响.

设相邻 2 帧图像分别为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$, 为了叙述方便这里假设 2 帧图像的内容没有变化,仅是相位变化.傅里叶变换分别为 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$, $f_2(x, y)$ 可表示为

$$f_2(x, y) = f_1(x + a, y + b) + \omega(x, y) \quad (2)$$

其中 $\omega(x, y)$ 为奇异目标引入的奇异项.设 $\omega(x, y)$ 的傅里叶变换为 $\Omega(u, v)$, 则有

$$\begin{aligned} F_2(u, v) &= F_1(u, v) e^{j\left(\frac{2\pi}{W}ua + \frac{2\pi}{H}vb\right)} + \Omega(u, v) = \\ &= |F_1(u, v)| e^{j\Phi_1} e^{j\left(\frac{2\pi}{W}ua + \frac{2\pi}{H}vb\right)} + |\Omega(u, v)| e^{j\Phi_\Omega} = \end{aligned}$$

$$|F_2(u, v)| e^{j\Phi_2}$$

其中, Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_Ω 分别为 $F_1(u, v)$ 、 $F_2(u, v)$ 、 $\Omega(u, v)$ 的相位谱,则 2 帧之间傅里叶相位差谱为

$$\begin{aligned} \Phi(u, v) &= \Phi_2(u, v) - \Phi_1(u, v) = \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{|F_1(u, v)| \sin \left(\Phi_1 + \frac{2\pi}{W}ua + \frac{2\pi}{H}vb \right) + |\Omega(u, v)| \sin \Phi_\Omega}{|F_1(u, v)| \cos \left(\Phi_1 + \frac{2\pi}{W}ua + \frac{2\pi}{H}vb \right) + |\Omega(u, v)| \cos \Phi_\Omega} \right) - \Phi_1 \end{aligned} \quad (3)$$

再对 $f_1(x, y)$ 图像平移有

$$F_2'(u, v) = F_1(u, v) e^{j\Phi(u, v)} \quad (4)$$

由式(3)可知,利用相位差的方法可以计算出 2 幅图像的相位差平面,即 $\Phi(u, v)$ 包含普通目标的位移信息,在对式(4)求傅里叶逆变换后,可以将前一帧的所有目标平移相同位移到后一帧的位置;同时 $\Phi(u, v)$ 中还包含奇异目标在后一帧中的相位信息,同样也可以通过傅里叶逆变换还原奇异目标.将得到的图像与后一帧图像做“减”处理,恒星图像基本消除,剩余卫星图像,从而实现了自动捕获.下面介绍该算法.

根据变量的可分离性,将 2 帧图像分别映射为一维 x, y 方向的分量,用 $f_{1x}(x)$ 和 $f_{2x}(x)$ 分别表示 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 在 x 轴的投影,用 $f_{1y}(y)$ 和 $f_{2y}(y)$ 分别表示 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 在 y 轴上的投影,即

$$f_{1x}(x) = \sum_y f_1(x, y), \quad f_{1y}(y) = \sum_x f_1(x, y)$$

$$f_{2x}(x) = \sum_y f_2(x, y), \quad f_{2y}(y) = \sum_x f_2(x, y)$$

则相位差在 x 方向的投影为 $\Delta\Phi_x(u) = \Phi_2 - \Phi_1 = -2\pi u \Delta x$, 所以 x 方向的偏移量为 $\Delta x = -\Delta\Phi_x(u) / 2\pi u$. 同理,可得 y 方向的偏移量为 $\Delta y = -\Delta\Phi_y(v) / 2\pi v$. 由于相位差 $\Delta\Phi$ 在 $[-\pi, \pi]$ 之间,且傅里叶变换具有周期性,为了避免相位差在闭区间计算时带来的周期误差,要对 2π 求模.

在实际问题中,噪声会对算法处理的结果产生影响.图 1 所示为未加噪声的待匹配图像及其傅里叶相位差谱,这里将傅里叶相位差谱的强度从 $[-\pi, \pi]$ 映射到 $[0, 255]$.

在图 2 所示的图像中加入均值为 22.5、方差为 5 的高斯噪声,从傅里叶相位差谱即可看出噪声的影响.可以看出,噪声对傅里叶相位差谱存在干扰,因此在应用傅里叶相位差谱之前应先对噪声图像进行去噪处理.经纬仪捕获的卫星图像中包含大量噪声,无法判断噪声的类型对图像进行去噪.下面提

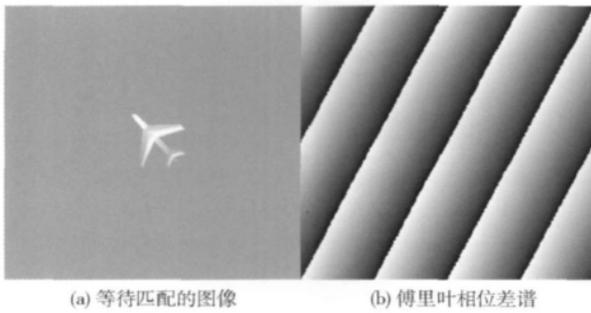


图 1 未加噪声图像

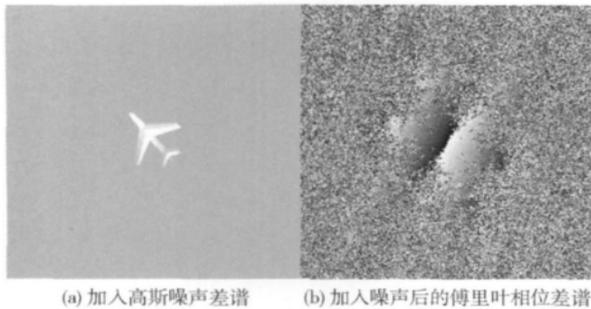


图 2 噪声影响

出一种改进的基于二维直方图的图像二值化算法,该算法是根据二维直方图的数据统计进行去噪的,可将卫星目标图像二值化.

2 基于二维直方图的图像二值化算法

针对不同种类的图像有不同的图像二值化算法,如基于一维直方图的单峰法和双峰法、基于二维直方图的最大类间方差法(即二维 Ostu 法)和最大二维信息熵法.前者图像二值化算法适用于处理目标和背景灰度值较明显的图像,而由于后者图像二值化算法引入图像位置信息,适用于处理一些对比度较低的图像,较前者的处理结果有很大改进.本文所要检测的卫星目标图像的背景内容较为单调,而且目标亮度较暗,有的甚至淹没在背景中,如果仅选择用像素灰度作为统计特征,则无法提取出亮度较弱的目标;为了区别亮度较弱的目标和背景像素,引入邻域均值作为检测弱目标的另一特征.图 3 (a)、(b) 所示的 2 帧图像有的目标对比度很低,如果应用基于一维直方图的单峰法只能提取出图像中最亮的目标(见图 3 (c)、(d)),而应用二维 Ostu 法虽然可以提取部分对比度较弱的目标,但结果不尽如人意,如图 3 (e)、(f) 所示.

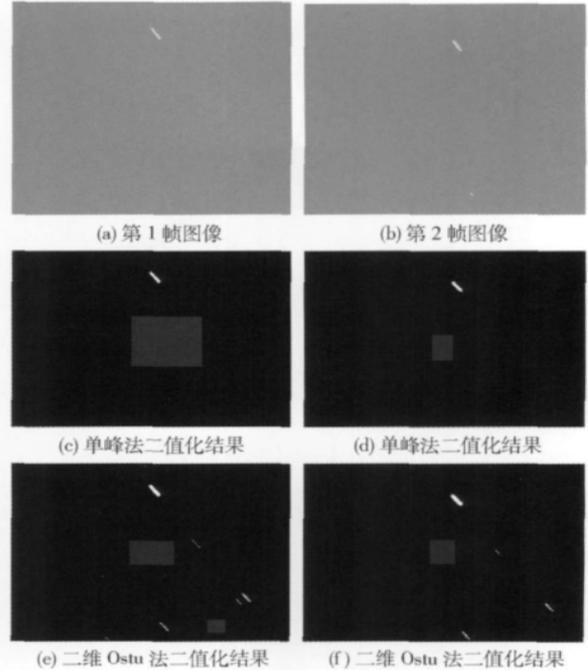


图 3 利用不同二值化算法处理结果

由图 3 的处理效果可以看出,传统算法无法满足需求,其原因在于图像中目标像素的数目与背景像素相差悬殊,并且有的目标像素对比度低,很难通过阈值分割提取出来.因此,二值化的着眼点不能放在图像灰度阈值选取上,而应该放在二维直方图的数据统计规律上.图 4 所示为根据图像中每像素的灰度值和 3×3 邻域的灰度均值统计的二维直方图.

由图 4 (a) 可以看出,图像的背景和目标主要分布在二维直方图对角线附近;由图 4 (b) 可以看出,二维直方图的对角线上的灰度分布.记二维直方图为 $N(m, n)$.与统计图像直方图的方法类似对二维直方图数据按式(5)进行统计.

$$P(k) = \frac{n_k}{XY}, \quad k=1, 2, \dots, XY \quad (5)$$

其中, X 和 Y 分别为图的宽度和高度, XY 即为图像总的像素数; n_k 为二维直方图中值为 k 的个数,为了简化计算可以预先统计 k 的取值范围.由于背景的像素数很大,所以在统计数据中出现的概率很小;而目标的像素数很小,其数值统计的概率会很大,于是可针对统计二维直方图像素数出现的次数设定阈值.如果出现次数多于阈值就可以认为是目标,反之认为是背景.虽然这样提取出的目标会包含若干

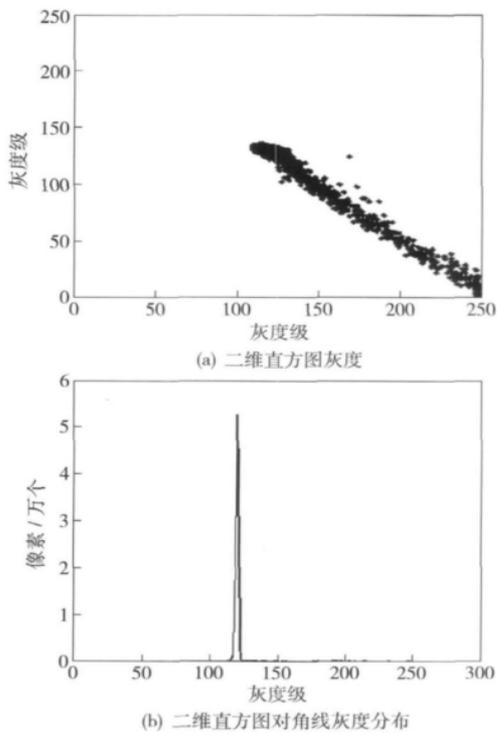


图 4 二维直方图统计

噪声点,但由于图像中目标拉线的形状特点,而噪声点通常是孤立的,很容易通过中值模板滤波的方法去除这些孤立的噪声点,结果如图 5 所示.

与传统二值化的方法相比,本文提出的改进算法能有效提取对比度低的目标,并且尽可能保护目标的形态.

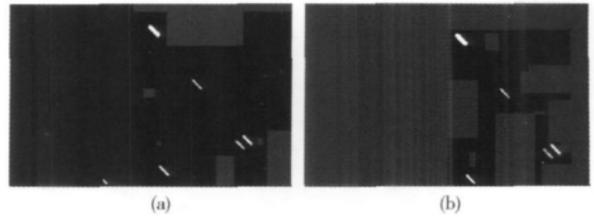


图 5 改进算法的二值化结果

3 实验与分析

本实验将给出连续 3 帧经纬仪拍摄卫星的图像,按照算法的设计步骤,首先去除噪声,将源图像二值化,然后求出每 2 帧之间的傅里叶相位差谱,并对前一帧图像进行相移补偿,与后一帧图像做减处理求出差图像,经过中值模板滤波将恒星残留像素去除后便可以识别出亮度变弱的奇异目标.在实际应用中,视场边缘的目标可能是新进入视场的,也可能在下一帧离开视场,会引起视场内容的变化,应用相位差法检测运动的目标会引起误检测,因此,在检测前应预先判断二值化后的图像中出现在边缘区域的目标是否引起图像内容的变化.可以利用帧差法比较当前帧和前后 2 帧的图像,如果该边缘目标是移入或移出视场,则忽略该目标.如图 6 所示,图 (a1)、(b1) 为连续 2 帧经纬仪拍摄的图像,其中包括一个进入视场的卫星(奇异目标);图 (a2)、(b2) 为图像二值化结果;图 6(b3) 为傅里叶变换后帧图像减运算的处理结果.

4 结束语

提出一种利用傅里叶相位差谱补偿的方法处理

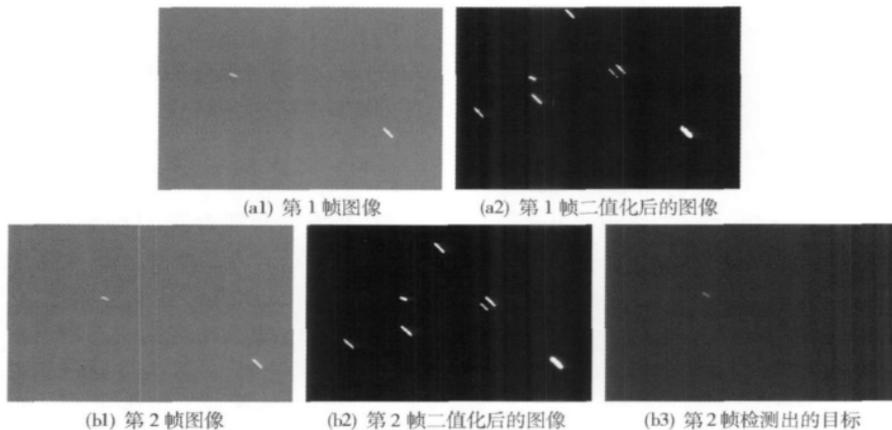


图 6 2 帧连续图像检测目标的处理结果

(下转第 109 页)

- Wang Yong, Xu Juanjuan. Study and analysis on synchronization for OFDM based power line communication systems [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, 47(532): 35-39.
- [6] 罗春风, 文劲宇, 杨慧敏, 等. 基于 OFDM 电力线载波通信系统同步新方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(17): 28-32.
- Luo Chunfeng, Wen Jinyu, Yang Huimin, et al. A new timing synchronization method for low-voltage OFDM power-line communication system [J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(17): 28-32.
- [7] Hooijen G. A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium [J]. *IEEE Tr Electromagnetic Compatibility*, 1998, 40(4): 331-336.
- [8] Chan M H L, Donaldson R W. Amplitude width and interarrival distributions for noise impulses on intrabuilding powerline communication networks [J]. *IEEE Tr on Electromagnetic Compatability*, 1989, 31(3): 320-323.
- [9] Zimmermann M, Dostert K. Analysis and modelling of impulsive noise in broadband power line communications [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, 44(1): 249-258.
- [10] Spaulding D, Middleton D. Optimum reception in an impulsive noise environment-part I: coherent detection [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1977, 25(9): 910-923.

(上接第 100 页)

序列图像检测奇异目标的算法,同时改进了传统的基于二维直方图图像二值化的算法提取出低对比度的目标,提高了算法的抗噪声能力.通过实验给出了处理实际图像的结果,由此可证明本文所提出的基于傅里叶相位差谱的目标检测算法是一种有效的目标检测算法.

参考文献:

- [1] 吴元昊, 于前洋. 基于傅里叶相位差的抗噪声位移估计算法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1137-1142.
- Wu Yuanhao, Yu Qianyang. Denoising algorithm of displacement estimation based on phase difference of Fourier transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(7): 1137-1142.
- [2] Stone H, Orchard M, Chang E, et al. A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2235-2243.
- [3] Lucchesel. A frequency domain technique based on energy radial projections for robust estimation of global 2D affine transformations [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 81: 72-116.
- [4] Stone H, Tao B, Mcguirem. Analysis of image registration noise due to rotationally dependent aliasing [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2003, 14: 114-135.
- [5] Belkasim S, Ghazal A, Basir O. Phase based optimal image thresholding [J]. *Digital Signal Porcessing*, 2003, 13: 636-655.
- [6] 马晶. 基于相位相关的深空光通信扩展信标跟踪技术研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(13): 515-519.
- Ma Jing. Extend-beacon tracking for deep space optical communication based on phase correlation [J]. *Opt Precision Eng*, 2006, 14(3): 515-519.
- [7] 罗师途. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 95-103.
- Luo Shitu. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle [J]. *Opt Precision Eng*, 2005, 13(1): 95-103.