

文章编号: 2096-1618(2017)03-0264-05

基于 NSCT 距离像的星空背景小目标检测技术

何 宇¹, 杨馥溢², 杨 璐²

(1. 成都信息工程大学信息中心, 四川 成都 610225; 2. 成都信息工程大学计算机学院, 四川 成都 610225)

摘要:点状空间目标和长条状背景星存在几何特征的不同,在频域中表现为:长条状背景星主要分布某方向子带上,而点状目标在所有方向子带上的分布近似相同。非下采样 Contourlet (NSCT) 变换可以对图像进行灵活的多尺度、多方向和平移不变性的分解,能很好地捕捉长条状轮廓,文中提出的基于 NSCT 距离像的目标检测技术中将某尺度上各方向分量间的比值作为特征向量,通过计算它与中心向量的距离得到距离像,从距离像的统计直方图中可以自适应地选择分割点状目标的门限,实验证明该方法能有效地检测图像中的点状小目标。

关键词:星空背景;非下采样 Contourlet 变换;方向子带;距离像

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.03.006

0 引言

空间小目标主要是指卫星以及进入空间轨道的助推火箭、保护罩等^[1],如能有效地从星空中检测目标,对于空间目标的定位、归类和编目是非常有意义的。常见的小目标检测^[2-3]是从一张图片中检测亮点,由于空间小目标的背景是浩瀚的星空,所以星空背景下的小目标检测^[4-6]还得思考如何从亮点中区分目标和背景星,显然现有的能有效检测云背景或海天背景下弱小目标的方法不能直接用在星空背景下的小目标检测。虽然帧差法^[7-9]能较有效地检测稀疏星空背景下的小目标,但是在密集星空背景下难以找到配准恒星以及受光晕的影响难以消除残差等原因,将导致不能完成密集星空背景下的弱小目标检测。

对于运动的目标,由于光电跟踪系统保证成像镜头相对于目标静止,所以此时空间目标成像近似为点状,而背景星成像则呈现为有方向的长条状,所以文中提出利用它们的几何特征实现区分和检测,而提取几何特征的工具为非下采样的轮廓波变换(NSCT),因为NSCT具有灵活的多尺度、多方向和平移不变性的分解特点。

吴一全等^[10-11]提出采用NSCT提取目标和背景的纹理特征,先对图像进行多尺度多方向分解,然后求取每个频率通道各点的局部能量,并将它们组合为该点的特征向量,对全图的特征向量求平均值,把它作为中心向量,计算每个特征向量与中心向量的距离,距离最大的为目标点。这种方法有很强的局限性,因为将

全图特征向量的平均值作为中心向量,所以建立在每个背景点的纹理特征是几乎相同的,也就是要求图像背景是纯净的,如果图像中存在具有其他纹理特征的物体的干扰就不能检测出目标,比如浮云,远处的景物,背景星空等,除此之外还要求小目标有比较高的信噪比,显然该方法不能直接用在星空背景下的弱小目标检测。但提出的利用NSCT提取目标和背景的纹理特征的想法值得借鉴。

1 背景星特性分析

图1为大小2048×2048的星空原图像,曝光时长为8 s,其中白框框选区是目标区。图2为放大后的星空图像,仿真目标大小为5×5,信噪比为:1.5 dB,其中白框框选的是放大后的目标区。

对图2进行傅里叶变换,得到图3所示的频谱图。可以看到有一个长条状主频带和分布于两边的两个旁瓣。长条状的主频带说明:星空图的频谱不论在高频

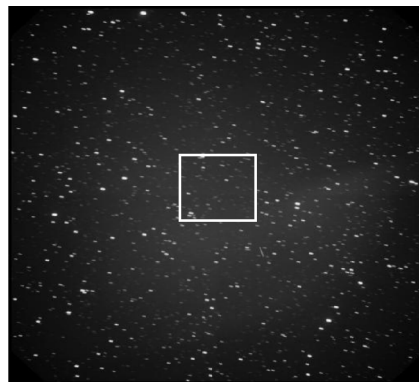


图1 有目标的星空图

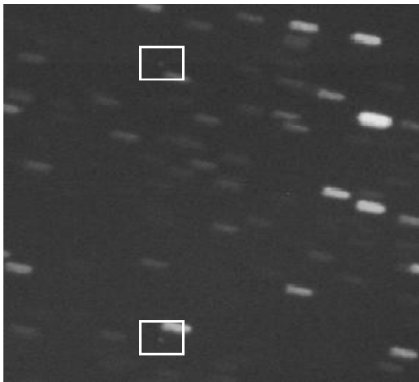


图 2 放大后的星空图像

域还是中低频域都主要集中在某个方向子带上,造成这个原因是长条状背景星是主频带的主要贡献者,而灰度值变换缓慢的背景属于非常低频的成分对主频带的贡献很小,背景星为短小的长条状,它的频率分量会呈现方向性且会有很多的高频分量。因此带状的主频带和两旁的旁瓣反映的是整体背景星的频率特性,这和星空图主要由长条状背景星构成相符。为进一步分析,根据多分辨分析理论^[12-13]对频谱图进行理想的 4 尺度分解,然后分别对子带进行 4 个和 8 个方向的分解,如图 4 所示。

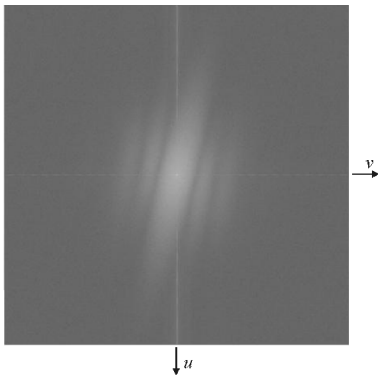


图 3 星空图像的频谱图

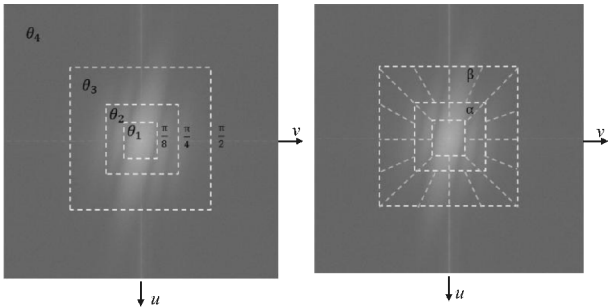


图 4 频谱图的 4 尺度分解图及对子带进行多方向分解后的频谱图

其中离中心点最远的为星空图的最高分辨率分量(也称高频分量或最高尺度分量),主要包含一些高频噪声,滤除该子带可以去除噪声;离中心点近的为星空图的低频分量。

现在主要讨论背景星和空间目标在子带上的分布情况:长条状背景星在子带上的分量主要集中在对称区域,也就是说在子带上存在主分量,而在子带上的分量除了集中在对称区域外还有一些以旁瓣的形式分布在其他方向子带上;对于呈现点扩散状的空间目标,它的频率分量在每个方向子带上近似相同,也就是说点状的空间目标在子带上的分量是近似均匀分布在每个方向子带上。

由上可知长条状背景星和点状空间目标在子带上的分布情况差异最大,所以可以利用背景星和空间目标在上具有不同分布这个特征来实现空间目标的检测。据此提出基于 NSCT 距离像的点状空间小目标的检测算法。

首先使用 NSCT 变换将星空图频谱按图的结构进行分解,得到星空图在子带上的 8 个方向的分量;其次将每个像素对应的 8 个方向分量的比值作为特征向量,并计算它与中心向量的欧式距离,得到距离像;最后根据距离像的统计直方图求取分割门限,从而检测出星空中的点状小目标。

2 无下采样 Contourlet 变换(NSCT)

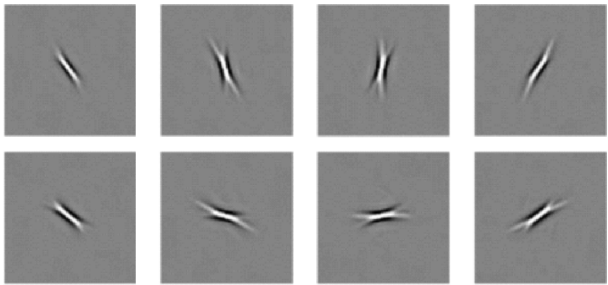


图 5 某尺度下 8 个方向的 NSCT 基函数

NSCT 变换是由 Arthur 等^[8]提出的一种具有完全的平移不变、多尺度、多方向的超完备变换,是在 Donoho 和 Vetterli 提出的 Contourlet 变换^[14]基础上改进的,用非采样塔式滤波器(NSP)和非采样方向滤波器(NSDFB)代替 Contourlet 中的拉普拉斯塔式滤波器(LP)和方向滤波器(DFB),相比于 Contourlet 变换,NSCT 变换具有更好的频率选择特性和规范性,关于 NSCT 和 Contourlet 变换的更多信息请查阅文献^[13-14]。这两种变换都是用轮廓段形式的基函数去逼近原始图像,因此称为轮廓波变换(Contourlet 变换),NSCT 在某个尺度下 8 个方向的基函数如图 5 所示,由于基函数提供了丰富的方向和形状,所以 NSCT 变换能更好的捕捉图像中的几何结构。

根据星空图的频谱特性,为更好地将长条状背景

星的主分量集中在某个方向子带上,对星空图进行 3 级 NSCT 变换,其中第二尺度和第三尺度的高频分量进行了 4 个和 8 个方向的分解(注:实际算法中只利用了第三尺度分量,为节省计算量可以只进行两级分解),分解示意图如图 6 所示,因为 NSCT 变换后所得的第 k 尺度下的第 n 方向上的分量是无下采样的分解,所以每个分量对应一幅和原图等大的分量图。该变换引起的频谱划分近似如图 7 所示,第 3 尺度上的主方向分量及另外 6 个方向上的分量,还有一个分量的图像因为篇幅限制并未列出,为了方便显示对分解得到的图像进行了二值化处理。所示,其中整个子带分量中的目标区如图 7(a) 所示。在子带的 8 个方向的分量中,图 7(b) 为与背景星同方向的分量,图 7(c) ~ (h) 为其他方向上的分量,从图中可以看出 NSCT 变换有很好的频率选择性、各向异性以及非常强的捕捉轮廓段的能力,因为 NSCT 变换使背景星的主要能量都集中在同方向的分量上而很少泄漏到其他方向的分量上

去。

除此之外,还可以看出背景星在子带上的分量相对集中,而点状空间目标在子带上的分量近似均匀分布,因此可以利用这一特征区分。

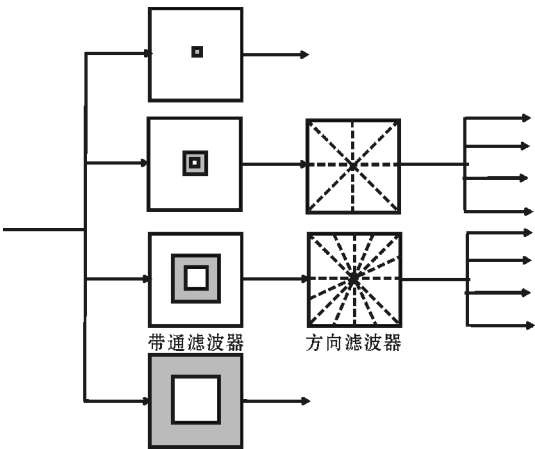


图 6 NSCT 变换分解星空图的示意图

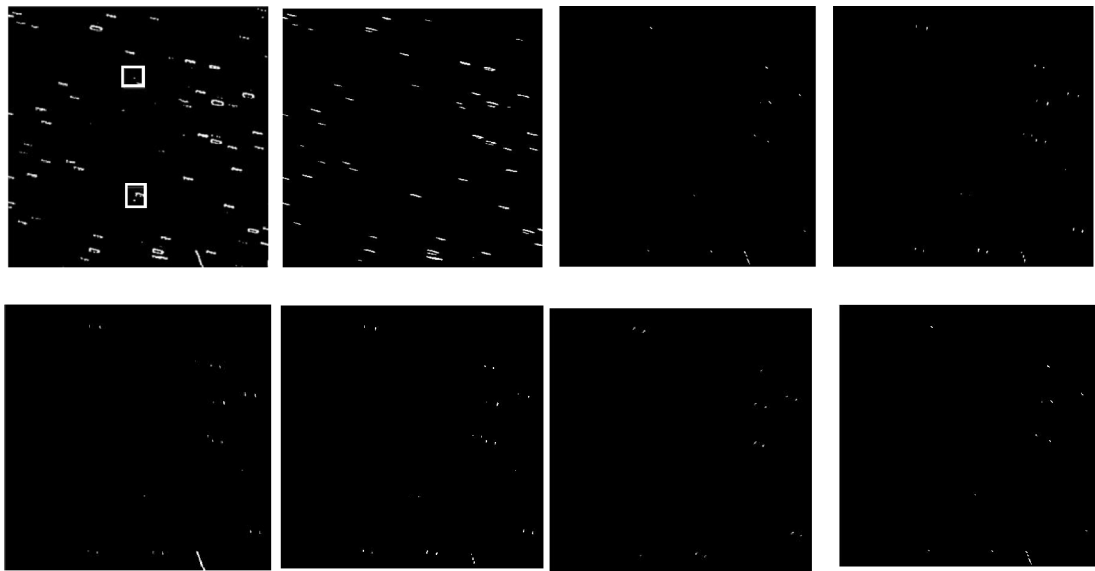


图 7 NSCT 变换所得的子带图像(星空图目标区第 3 尺度的分量)

3 目标检测算法

定义第三尺度下各个方向分量所占比例为

$$p_{(x,y)}\{n\} = \frac{\text{coeffs}\{3\}\{n\}_{(x,y)}}{\sum_{n=1}^8 \text{abs}(\text{coeffs}\{3\}\{n\}_{(x,y)})}, n = 1, 2, \dots, 8 \tag{1}$$

其中 n 为方向, abs 是对分量求绝对值, 每个分量大小和输入的星空图相同。

定义像素点的特征向量为

$$F_{(x,y)} = \{p_{(x,y)}\{n\}, n = 1, 2, \dots, 8\} \tag{2}$$

将第三尺度各方向分量所占比重作为特征向量,

所以它和图像的灰度值没有关系, 只和像素点所在区域的纹理有关, 因此该特征向量具有更强的抗干扰性。

因为以各方向分量的比值作为特征向量, 而且方向数为 8, 所以可以选择中心向量为

$$F_0 = \left\{ \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8} \right\}$$

定义特征向量与中心向量间的距离为

$$d_{(x,y)} = \sqrt{\sum_{n=1}^8 \left(p_{(x,y)}\{n\} - \frac{1}{8} \right)^2} \tag{3}$$

因为点状目标在各方向上的分量近似相同, 所以与中心向量的距离最小且接近于零, 而长条状背景星存在主方向分量, 因此与中心向量的距离比较大, 除此之外, 其他背景区域因为没有背景星和目标的存

以属于低尺度分量,因而在该尺度上各方向分量系数非常的小而且相互之间相差较大,所以与中心向量的距离也比较大,因此可以根据每个像素点处的距离大小来判断该点是否为目标点。

通过求取各点的特征向量与中心向量的距离就可得到一幅和原图等大的距离像,根据距离像的统计直方图可以自适应的得到用于检测目标的阈值^[10,15]。

- 目标检测算法的具体步骤为:
- (1)对图像进行 3 级且第 2 级为 8 个方向的 NSCT 变换(如图 5 所示),得到分量图像。
 - (2)根据公式和求取每个像素各分量间所占比例,并将比值形成该像素的特征向量。
 - (3)计算特征向量与中心向量的距离,如式(3),并对所有的距离进行归一化处理,接着将它形成具有 65536 个灰度级的距离像。
 - (4)求取距离像的统计直方图,目标在直方图中主要分布在频数小且距离近的区域,假定目标像素点数不超过 Q ,从直方图的最左边开始向右作频数累加,寻找第一个频数累加值不超过 Q 的位置,该位置的值记为 T 。
 - (5)以 T 为阈值对距离像进行二值化,如下:

$$f_{(x,y)} = \begin{cases} 1, & D(x,y) \leq T \\ 0, & D(x,y) \geq T \end{cases}$$

- 其中 $f_{(x,y)}$ 是检验结果。
- (6)利用其他一些先验知识来排除其中的一些误检点,比如一些误检点出现在长条状背景星的两个端点处或者是在一些噪声点处,因为小目标的信噪比小于背景星而大于噪声点,所以可以利用目标点的信噪比范围来排除这些误检点。

4 实验与结论

为验证算法的有效性,在不同类型的恒星景下进行了小目标检测实验,包含小目标的目标区图像如图 10 所示,可以看到它们之间背景星的疏密程度、方向和长短都不一样,并且小目标的个数和信噪比都有所不同。

按照上述方法对星空图像进行如图 6 结构所示的 NSCT 变换,用第三尺度上的 8 个分量比值形成特征向量,求特征向量与中心向量间的距离,将它规范化为 256 个灰度级的距离像,如图 8 中的所示。因为 256 个灰度级表示范围有限导致除开白框中的目标外还存在许多接近黑色的像素点,即使这样白框中的目标对应的灰度值仍是最小的。图 9 中的为距离值规范化为 65536 个灰度级形成的统计直方图,规范为 65536 个灰度级是为了能更精确的求取阈值。从直方图中可以

看出绝大部分像素的距离值都是分布在远大于零的区域,这与之前分析的相同,但是在接近于零的区域直方图曲线是缓慢连续的,将导致没有明显的分割阈值,这是因为星空图的背景比较复杂而且目标的像素点非常少导致的。按照算法步骤从统计直方图中求取阈值、分割图像,再利用其他一些先验知识,比如小目标的信噪比范围等排除一些误检点,得到最终的检测图像,图 10 为最终的检测结果,其中图 10(a) ~ (c) 为待检测的原图,图 10(d) ~ (f) 为检测到的目标图。

用 MATLAB 10.0 实现该算法,输入图像大小为 2048×2048,目标信噪比为 1.5 dB,计算环境为:CPU: Intel (R) Core (TM) i5-2520 M 2.50 GHz; RAM: 2.00 GB;操作系统:Windows 7。运行检测算法耗时接近 4 min。

从实验结果中可以看出文中提出的基于 NSCT 距离像的小目标检测技术对于检测长条状背景星下的弱小目标有非常好的效果,这是由于非下采样轮廓波变换(NSCT)具有良好的多尺度和多方向分解特性,能很好表示长条状背景星与点状目标几何特性的不同。除此之外,如果通过插值法提前求出图 6 中的所有带通滤波器和所有的方向滤波器,而不是按照树形结构逐级求取,那么 NSCT 变换可以通过并行计算实现,这样会大大提高算法的实时性。

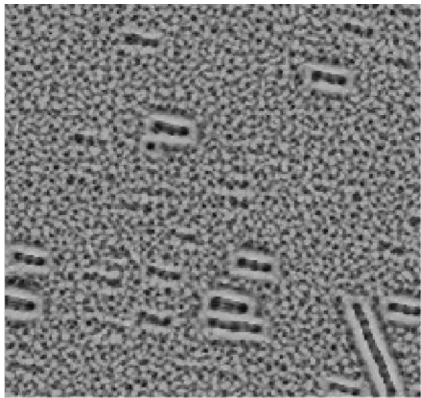


图 8 距离像

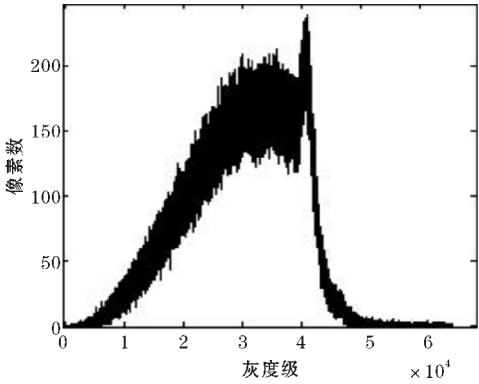


图 9 直方图

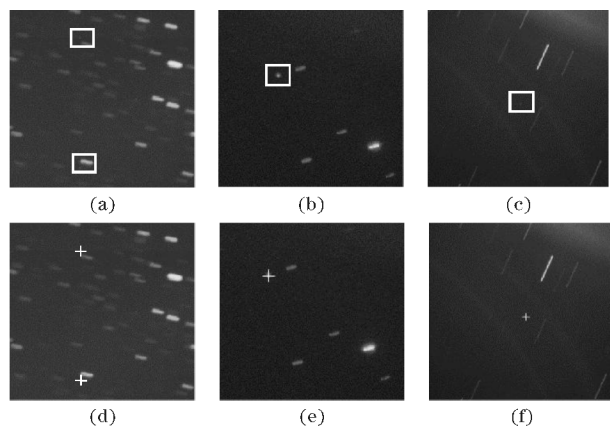


图10 基于 NSCT 距离像的星空背景小目标检测结果
(框选的为目标;十字为检测算法对目标的标记)

5 结束语

提出一种基于 NSCT 距离像的星空背景小目标检测算法。通过对图像进行 NSCT 变换,根据分量的比值形成像素的特征向量,计算特征向量与中心向量的距离,进而得到距离像的统计直方图,从而实现目标的检测。

参考文献:

- [1] 魏敦生. 星空背景下小目标的跟踪与识别[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [2] 魏芳. 基于多尺度几何分析的红外弱小目标检测方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [3] 孟威. 复杂背景自适应红外小目标检测[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [4] 关雪梅. 基于空域的图像增强技术研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2012,(8):22-24.
- [5] 修鹏山. 深空背景下小目标检测和跟踪[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [6] 郭晓军,万龙,刘峰. 基于扩展卡尔曼滤波的空间小目标跟踪算法[J]. 电光与控制,2016,(4):57-61.
- [7] 黄宗福,孙刚,陈曾平. 空间目标检测序列图像中恒星目标抑制[J]. 中国图像图形学报,2013,(7):799-804.
- [8] Ha-ning X, S-y Z, Ping-yuan C. Deep space moving target detection based on technology of image matching[J]. Control and Decision Conference: IEEE, 2014:3294-9.
- [9] 杨馥溢,杨璐,魏敏,等. 星空背景的多运动小目标检测方法[J]. 成都信息工程大学学报,2016,31(6).
- [10] 吴一全,罗子娟,吴文怡. 基于 NSCT 的红外图像小目标检测技术[J]. 中国图像图形学报,2009,(3):477-81.
- [11] Do MN, Vetterli M. Framing pyramids. Signal Processing[J]. IEEE Transactions on, 2003, 51(9):2329-42.
- [12] Do M N, Vetterli M. Contourlets: A directional multiresolution image representation[J]. 2001,(1):357-360.
- [13] Da Cunha AL, Zhou J, Do MN. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications. Image Processing[J]. IEEE Transactions on. 2006, 5(10):3089-101.
- [14] Do MN, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. Image Processing[J]. IEEE Transactions on. 2005, 14(12):2091-106.
- [15] 盛文,邓斌,柳健. 一种基于多尺度距离像的红外小目标检测方法[J]. 电子学报,2002.

A Method of Small Target Detection in the Starry Sky Background based on NSCT Distance Map

HE Yu, YANG Fu-yi, YANG Lu

(1. Center of information, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of computer sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: There are some differences of geometry features between the points-like small target and the strip-like background stars. In the view of frequency analysis, the background stars will have a main direction band in the frequency domain, because it has a Strip-shaped look, while the points-like small target can be treated as pulse signal, so its energy will distribute all the band of frequency domain. The Nonsubsampling Contourlet Transform (NSCT) has flexible multi-scale, multidirection, and shift-invariant image decomposition characteristics, so it can efficiently capture the differences of the geometry features. This paper proposes a detection method based on the NSCT Distance Map: defined the ratios between each direction component as a feature vector, and then get a distance image by calculating the distance between the feature vector and the center vector, after that, can adaptively get the threshold that used to segmented the small target from the image from the grayscale histogram. Experiments show that the method can efficiently detect the small target from the image.

Keywords: in the starry sky background; NSCT; direction band; distance map