# 基于 NSCT 变换的红外空中小目标检测方法研究

刘 刚<sup>1,2</sup> 梁晓庚<sup>3</sup> 张灵玲<sup>4</sup>

(西北工业大学自动化学院 西安 710072)<sup>1</sup> (河南科技大学电子信息工程学院 洛阳 471003)<sup>2</sup> (洛阳光电技术发展中心 洛阳 471009)<sup>3</sup> (洛阳理工学院 洛阳 471023)<sup>4</sup>

摘 要 针对空中远距离红外小目标检测的实际问题,提出了一种基于非抽样轮廓波变换的检测算法。首先利用非抽样轮廓波变换的优良性质,通过分析噪声系数、背景边缘系数和目标系数在尺度间的不同特性,计算各个信号在尺度间的相关系数并归一化。接下来,按照自适应阈值法抑制噪声和背景边缘系数,然后通过反变换得到抑制背景增强目标的图像。最后,结合目标面积信息选择适当阈值,对重构图像进行分割,生成单帧检测结果并进一步利用帧间目标位置的相关性完成小目标检测过程。试验结果表明,提出的算法能够准确地检测目标。相对于通常的小目标检测算法,本算法在背景抑制方面具有一定的优势,能够获得相对较高的信嗓比。 关键词 红外小目标,非抽样轮廓波变换,尺度间相关系数,背景抑制,信嗓比

**中图法分类号** TP391.41 文献标识码 A

#### Research on Infrared Small Target Detecting in the Sky in NSCT Domain

LIU Gang<sup>1,2</sup> LIANG Xiao-geng<sup>3</sup> ZHANG Ling-ling<sup>4</sup> (Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnology University, Xi'an 710072, China)<sup>1</sup> (Department of Electronics and Information, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)<sup>2</sup> (Luoyang Optoelectro Technology Development Center, Luoyang 471009, China)<sup>3</sup> (Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)<sup>4</sup>

Abstract In order to solve the practical problem of the infrared small target's detecting in the sky, a detecting algorithm based on the NSCT(nonsubsampled contourlet transform) was proposed. Firstly, taking advantage of the excellent property of the transform, this algorithm analyzed the different property of the NSCT coefficients of noise, background edge and signal, then computed the normalized correlation coefficients between scale for the transform coefficients. Subsequently, according to the adaptive method of threshold, the coefficients of background edge and noise were suppressed and then the image which includes the enhanced target was acquired by the inverse transform. In the end, taking the target area into account, the reconstructed image was partitioned and the final detecting result was acquired by considering the position correlation of the target between frames. Experimental results show that the method given by this paper can detect small target accurately. Compared with some traditional method, it has certain advantage in background suppressing and can acquire high SNR(signal noise ratio) value.

Keywords Infrared small target, Nonsubsampled contourlet transform, Correlation coefficient between scale, Background suppression, Signal noise ratio

## 1 引言

在红外空中探测中,目标在远距离时呈现点状,无明显形 状信息,在成像平面上信息量极少(只占几个像素点)。红外 图像为热辐射图像,小目标的亮度通常高于背景亮度,而且目 标面积小,亮度变化也较小。天空背景主要由云层、雨、雾等 构成,而噪声则主要是红外系统内部的噪声干扰。红外小目 标图像背景干扰面积大,信噪比较低,它的这种空间特性使得 传统的利用目标大小、形状以及特征的图像处理技术无法得 以应用。因此,较远距离成像的小目标检测问题是近年来红 外图像检测与处理研究的热点和难点。由于小目标的检测是 判断图像中的孤立奇异点,而小波变换可以很好地区别位于 高频部分的目标(奇异点)与位于低频部分的背景,因此小目 标检测得到了人们的重视<sup>[14]</sup>。

但是,二维可分离小波变换只具有水平、垂直、对角 3 个 方向,方向性和各向异性上的缺陷使小波变换不能很好地表 示图像中的方向信息。Do 等提出了一种真正二维图像表示 方法:Contourlet 变换,一种多尺度的、局部的、方向性的二维 图像分析方法<sup>[5]</sup>。但是,由于存在下采样过程,Contourlet 变 换缺乏平移不变性,图像处理后在边缘处会产生伪 Gibbs 失

#### 到稿日期:2010-05-05 返修日期:2010-08-19

刘 刚(1974-),男,博士生,讲师,主要研究方向为图形图像处理、智能控制、软件工程,E-mail:lg19741011@163.com;梁晓庚(1960-),男,研 究员,博士生导师,主要研究方向为控制与仿真、飞行器设计、图像处理;张灵玲(1974-),女,讲师,主要研究方向为数据挖掘、模式识别。

真。随后,Cunha 等提出了非抽样 Contourlet 变换(nonsubsampled contourlet transform, NSCT),它既具有 Contourlet 变换的优点,又具有平移不变性,因而可以有效地解决伪 Gibbs 失真这个问题<sup>[6,7]</sup>。NSCT 不仅能将图像各频带区分 开,且多向和平移不变性使其细节保护能力增强。因此,如果 将其应用到红外小目标检测当中,应当能够得到优于小波变 换的结果。吴一全等分别利用 Contourlet 变换和 NSCT 变 换,对红外小目标图像构造多尺度距离像,进而通过直方图统 计实现小目标检测<sup>[8,9]</sup>。

本文提出了一种新的基于 NSCT 变换的红外小目标检 测方法。将小波系数尺度间的相关性特征引入到 NSCT 变 换系数中,通过区分目标系数与背景边缘、噪声系数在尺度间 相关系数的差异,结合帧间相关性来达到抑制背景并最终检 测目标的目的。仿真结果表明,本文方法能够准确稳定地检 测出信噪比大于 2 的弱小目标。

## 2 非抽样 Contourlet 变换

Contourlet 变换不仅继承了小波变换的多分辨率时频分 析特征,而且拥有良好的各向异性特征,能够对图像进行更好 的稀疏表示,能准确地把握图像几何结构信息,有效地捕捉到 自然图像中的轮廓。Contourlet 变换把图像分解成各个尺度 上的带通方向子带。拉普拉斯金字塔(Laplacian pyramid, LP)塔形分解被用来完成 contourlet 变换的多尺度分解。每 一级 LP 分解将产生一个上一级信号的低通采样和由低通采 样与上一级信号的差值得到的一个带通分量。下一级多尺度 分解在产生的低通采样上迭代进行。方向滤波器组(directional filter bank,DFB)把 LP 分解得到的带通图像的频谱划 分成楔形频率子带,完成 Contourlet 各个尺度上的方向分解。

Contourlet 变换存在下采样过程,因此低频子带和高频 子带均存在频谱混叠现象。频谱混叠造成同一方向的信息会 在几个不同方向子带中同时出现,这在一定程度上削弱了其 方向选择性。NSCT 与 Contourlet 变换一样,也是采用由 LP 变换与 DFB 所构成的双迭代滤波器组结构。两者的区别在 于 NSCT 采用的是非采样 LP 和非采样 DFB,变换时首先由 非采样塔状滤波器将图像分解为低频部分和高频部分,然后 由非采样方向性滤波器组将高频部分分解为若干个方向。 NSCT 去掉了 LP 分解和 DFB 分解中信号经分析滤波后的下 采样(抽取)以及综合滤波前的上采样(插值),而改为对相应 的滤波器进行上采样,再对信号进行分析滤波和综合滤波。

NSCT 继承了 Contourlet 变换的多尺度、多方向以及良 好的空域和频域局部特性,变换后系数能量更加集中,能够更 好地捕捉和跟踪图像中重要的几何特征。同时,由于没有上 采样和下采样,图像的分解和重构过程中不具有频率混叠项, 使得 NSCT 具有平移不变性以及各级子带图像与原图像具 有尺寸大小相同的特性。

红外小目标图像经 NSCT 变换后由低频子带和高频子 带构成。低频分量主要反映了背景的特征,而目标则包含在 各个高频分量中。在 NSCT 变换得到的高频子图中已滤除 大范围连续的背景信息,只包括背景边缘信息和奇异点集,而 小目标就包含在奇异点集内。图 1 是红外小目标视频 1 中一 顿图像的 NSCT 变换二级分解,方向数分别为 4 和 2。图像 大小为 128×128, NSCT 变换系数按照下式处理后进行显 示,c为NSCT变换系数。



图 1 红外小目标图像的二级 NSCT 分解

#### 3 NSCT 域小目标检测算法

在小波分析中,含噪信号在多尺度分解后,真实信号在各 尺度间相应的系数上具有很强的相关性,而噪声对应系数的 相关性则很弱或者不相关。因此相邻尺度小波系数相关性可 以用来确定哪些系数是由图像中的噪声产生,哪些是由图像 中的细节特征产生<sup>[10,11]</sup>。NSCT 变换同样采用多级分解方 式,NSCT 系数在尺度间的相关特征与小波系数类似,因此可 将该判别准则推广到 NSCT 变换域。

从图1中可看出,高频每个方向上的检测图像中包含小目标信息、噪声和少量的背景信息(包含了没有滤除的边缘信息)。由于背景信息具有一定的形状特性,在NSCT分解后的不同尺度、不同方向高频分量上的位置分布相关性较弱;而小目标不具有形状特性,在分解后的不同尺度、不同方向高频分量上的位置分布相关性较强。利用不同信号NSCT系数在不同尺度、不同方向上相关特性的不同,可以进一步抑制背景和噪声信息并增强目标。本文提出的NSCT域红外小目标检测流程如下。

步骤1 对小目标红外图像进行 NSCT 变换,将图像分 解为低频部分和高频部分。

步骤 2 对每一尺度、每一方向的 NSCT 系数,按下式计 算相关系数:

 $corr(j,d,m,n) = c(j,d,m,n) \prod_{r=1}^{l_{j+1}} c(j+1,r,m,n)$  (2)

式中,c(j,d,m,n)表示尺度 j 方向 d 位置(m,n)处的 NSCT 变换系数, $l_{j+1}$ 代表尺度 j+1的分解方向数。

步骤 3 相关系数归一化:

$$\overline{corr(j,d,m,n)} = corr(j,d,m,n) \left(\frac{ec(j,d)}{ecorr(j,d)}\right)^{0.5}$$
(3)

$$ec(j,d) = \sum c(j,d,m,n)^2$$
(4)

$$ecorr(j,d) = \sum \sum corr(j,d,m,n)^2$$
(5)

式中,*ec*(*j*,*d*)和 *ecorr*(*j*,*d*)分别表示尺度 *j* 方向 *d* 的 NSCT 系数能量和相关系数能量。

步骤 4 利用归一化相关系数来区分目标系数、背景边 缘系数和噪声系数。若

步骤5 若达到最大尺度且方向遍历完毕,进入下一步;

反之回到步骤2。

步骤 6 将低频 NSCT 系数置零,结合保留的 NSCT 系数实施 NSCT 反变换。

步骤 7 将 NSCT 反变换后得到的重构图像按下式进行 映射,以拉大重构图像的灰度范围。g 为图像灰度。

$$g' = \left[ |g| \times \frac{255}{\max(|g|) - \min(|g|)} \right]$$
(7)

步骤 8 利用阈值法分割重构图像。阈值按如下方法确 定:对于小目标图像,利用成像传感器的灵敏度、分辨率、可成 像距离和目标可能的实际大小等信息,可估计目标在图像中 的面积大小,即所占像素数目 m<sub>0</sub>,本文取 10 个像素。以重构 图像灰度中值为起点,在直方图上正向搜索第一个统计数为 m<sub>0</sub>的灰度值作为分割阈值。

步骤 9 利用目标在相邻帧间位置的相关性,通过多帧 图像综合表决,获得包含最终目标的图像<sup>[12]</sup>。

4 试验与分析

试验运行硬件环境为联想笔记本,CPU为 Intel 酷睿 2 双核,主频为 2GHz,内存为 2GB。软件环境为 matlab7.0。 NSCT 变换中塔形滤波器取"9-7",方向滤波器取"pkva",进行 3 级分解,方向数为 8,4,1。与 NSCT 做比较的小波变换 基为"haar",采用二维平稳小波变换函数 swt2 进行变换。

### 4.1 本文算法的试验验证

对图 1(a)、红外小目标视频 2 中的一帧图像分别按照小 波低频抑制、小波相关抑制、NSCT 低频抑制和 NSCT 相关抑 制进行噪声和背景的抑制,效果如图 2 所示。从图 2 中可看 出,无论是在小波域还是 NSCT 域,相关法抑制背景和噪声 的能力都强于低频直接抑制法,NSCT 相关法则优于小波相 关法,这些主要表现为所包含的噪声和云层背景边缘要少。





对两个视频中的两帧图像分别按照小波域相关抑制和 NSCT 域相关抑制处理后,进行阈值分割得到图 3。从处理 结果可看出,对经过 NSCT 域相关抑制后的图像进行分割都 准确地检测出了小目标的位置,而小波域分割则包含虚警点。



图 3 阈值分割效果图

取视频1的100帧包含小目标的连续图像,利用本文算 法进行检测,在不考虑序列相关性的条件下,单帧检测率达到 97%。如果进一步利用目标在相邻帧间位置的相关性进行多 帧综合,则可全部实现目标检测。

#### 4.2 本文算法的背景抑制效果

为了验证本文算法的背景抑制效果,将两帧原图像分别 经过空域高通滤波、形态学顶帽变换滤波<sup>[13]</sup>、巴特沃斯高通 滤波、小波相关法和本文提出的 NSCT 相关法进行处理,效 果如图 4 所示。相关法只执行到第 3 节的步骤 7。空域高通 滤波器为:



图 4 对图 1(a)、图 2(e)利用各个算法背景抑制效果图

巴特沃斯滤波的截止频率为 12.8。从图 4 中可以看出, 空域高通滤波背景残留最多,形态学顶帽变换法与巴特沃斯 法目标较弱,而相关法得到的目标最强。为了定量衡量算法 背景抑制效果,给出两帧小目标图像经过各算法处理后的信 噪比,如表 1 所列。从中可看出,两帧图像中 NSCT 相关法的 信噪比值都达到了最大。信噪比的计算如下式:

信噪比=
$$\frac{s-\mu}{c}$$
 (9)

式中,s为目标灰度,µ代表目标邻域的灰度均值,σ是灰度标 准差。考虑到检测目标大小,这里取40×40邻域。

表1 各个算法的信噪比值

	155 1351 ///	<b>ウドナ</b> ゴ	形态学	巴特沃	小波	NSCT
	原图家	空域而通	顶帽	斯高通	相关	相关
图 1(a)	2,7343	1,7108	6.4608	5.4417	16.6839	17.4676
图 2(e)	3. 5816	5.1208	4.4955	4.3977	12.3202	15.6088

结束语 本文通过分析不同信号在尺度间相关性的差异 特征,在 NSCT 域研究了距离较远的红外小目标检测方法。 与一些常用的检测算法相比,本文给出的算法在背景抑制方 面具有一定优势,能获得相对较高的信嗓比。实际的红外小 目标图像检测说明,本文算法能够获得准确有效的检测结果。

## 参考文献

- [1] 李利荣,张桂林. 基于小波变换的小目标检测[J]. 测控技术, 2004,23(6):67-69
- [2] 过润秋,李大鹏,林晓春. 红外点目标检测的小波变换方法研究 [J]. 光子学报,2004,33(4):464-467
- [3] 李国宽,彭嘉雄,李红.基于向量小波变换的小目标检测方法 [J]. 华中科技大学学报,2000,28(1):73-75
- [4] 李哲,苏秀琴,杨小君,等. 红外运动小目标的检测[J]. 光子学 报,2006,35(6):924-927

并发系统。二维抽象首先对所有进程单独进行抽象,然后利 用参数化系统的设计思想,隐藏系统参数建立全系统的抽象 模型,最大限度地剔除了原始系统中的冗余信息。TDA 模型 关于 ACTL \* 公式弱保持,而且在 TDA 模型中成立的单索引 ACTL \* 公式,在任意规模的原始模型中也成立,为简化参数 化系统验证提供了理论依据,也为相关研究工作奠定了良好 的基础。

## 参考文献

- [1] 屈婉霞,李暾,郭阳,等. 谓词抽象技术研究[J]. 软件学报,2008, 19(1):27-38
- [2] Shuvendu K L, Randal E B, Indexed Predicate Discovery for Unbounded System Verification[C]//Proc. of the 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Aided Verification(CAV'04). Boston,

### (上接第 281 页)

表1 提出的水印算法和基于 Zernike 矩算法的运行时间(单位:ms)

	压缩	裁剪	加噪	平移	旋转	缩放		
<b>k</b> ==5	0.352	0.380	0.316	0.288	0.339	0.197		
k=3	0.686	0.749	0.563	0.597	0.655	0.290		
k=1	1.89	2.26	1.78	1.86	2.06	0.950		
Zernike	297	360	302	282	348	153		

结束语 本文首先研究了图像不变质心的特点和性质。 为了使不变质心对几何攻击以及其他攻击具有更好的抵抗能 力,对不变质心的提取方法进行了改进,不对整个图像求不变 质心,而是对图像进行小波分解后,对小波低频域提取不变质 心,取得了良好的效果。接着根据水印图像的大小自适应地 对载体图像进行适当级的小波分解,将水印嵌入到对干扰不 敏感的最后一级小波低频域,兼顾了水印的嵌入容量和不可 见性。将含水印图像用改进的方法对小波域低频子图求得一 系列基于不变质心的不变量后,基于这些不变量对攻击所具 有的稳定性,定义了含水印图像的不变特征矩阵,并联合 Rijndael 加密技术实现了版权的认证,在提高水印算法可靠性 的同时,使算法具有很好的鲁棒性。

该算法可嵌入实际的比特序列。实验结果表明,本文提 供的水印算法能够抵抗包括平移、旋转、缩放等几何攻击在内 的各种攻击,在提取水印时不需要原始载体图像和原始水印 图像,从水印的透明性、水印嵌入容量和水印鲁棒性以及算法 复杂度等指标来看,均具有较好的实效性。

# 参考文献

[1] Lee C H, Lee H K, Suh Y G. Image Watermarking Resistant to Combined Geometric and Removal Attacks [J]. International

(上接第 294 页)

- [5] Do M N, Vetterli M. The Contourlet transform: an efficient directional multiscale image representation [J]. IEEE Trans on Image Proc, 2005, 14(12): 2091-2106
- [6] Zhou Jian-ping, Cunha A L, Do M N. Nonsubsampled contourlet transform: construction and application in enhancement[C] // Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway, NJ: IEEE, 2005, 1:469-472
- [7] Cunha A L, Zhou Jian-ping, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design and applications [J]. IEEE Trans on Image Proc, 2006, 10(15): 3089-3101

USA: Springer, 2004: 276-289

- [3] Amir P, Jessica Xu, Lenore Z. Liveness with(0;1;∞) Counter Abstraction[A]// Proc. of the 14<sup>th</sup> International Conference on Computer Aided Verification(CAV'02)[C]. Copenhagen, Denmark, Springer, 2002, 61-70
- [4] Muralidhar T. Abstraction Techniques for Parameterized Verification[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006
- [5] 曾红卫,缪淮扣.构件组合的抽象精化验证[J].软件学报,2008, 19(5):1149-1159
- [6] Konnov I V, Zakharov V A. An Invariant-Based Approach to the Verification of Asynchronous Parameterized Networks[C]// the 1<sup>st</sup> workshop on Invariant Generation(WING2007). Hagenberg, Austria. Springer, 2007, 41-55
- [7] 屈婉霞, 庞征斌, 郭阳, 等. 参数化系统二维抽象框架[J]. 国防科 技大学学报, 2010, 32(1):95-100

Journal of Image and Graphics, 2005, 5(1): 37-66

- [2] 金聪,彭嘉维. 基于图像投影序列的盲数字水印鲁棒检测方法 [J]. 软件学报,2005,16(2):295-302
- [3] Lin P L, Hsieh C K, Huang P W. A Hierarchical Digital Watermarking Method for Image Tamper Detection and Recovery[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(12): 2519-2529
- [4] Kim H S, Lee H K. Invariant Image Watermark Using Zernike Moments[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 766-775
- [5] 李雷达,郭宝龙,刘雅宁.基于伪 Zernike 矩的抗几何攻击图像 水印[J].光电子·激光,2007,18(2):231-235
- [6] 沃焱,韩国强. 基于修改的 Zernike 矩的抗几何攻击的数字水印 方法[J]. 计算机科学,2009,36(5):247-250,281
- [7] Liu Jun, Yang Huijuan, Kot A C. Relationships and Unification of Binary Images Data-hiding Methods[C] // IEEE International Conference on Image Processing. 2005, 1: I-981-4
- [8] Ji Z, Jiang L, Jin J. An Improved Second Generation Digital Image Watermarking Scheme [C] // Mathematics of Data/Image Coding, Compression, and Encryption VI, with Applications. 2004,5208:218-223
- [9] 凌贺飞,卢正鼎,邹复好.抗几何攻击的数字水印技术综述[J]. 计算机工程与科学,2006,28(11):42-47,50
- [10] 钟桦,张小华,焦李成.数字水印与图像认证——算法及应用 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006
- [11] Seo J S, Yoo C D. Image Watermarking Based on Invariant Regions of Scale-space Representation[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2006, 54(4): 1537-1549
- [12] Jamil T. The Rijndael Algorithm[J]. IEEE Potentials, 2004, 23(2): 36-38
- [13] 王炳锡. 数字水印技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
- [8] 罗子娟,吴一全. 基于 contourlet 变换的红外图像序列小目标检 测技术[J]. 信号处理,2008,24(4):676-679
- [9] 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]. 中国图象图形学报,2009,14(3):477-481
- [10] 唐志航,黄哲,张东衡,等. 基于尺度相关性的自适应图像增强新 算法[J]. 计算机应用,2006,26(9):2084-2086
- [11] 韩敏,刘云侠.改进的双小波空域相关混沌信号降噪方法[J].系 统仿真学报,2009,21(15):4743-4747
- [12] 徐军,周翔,梁昌洪. 红外序列图像弱小目标检测算法[J]. 红外 与激光工程,2003,32(4):390-393
- [13] 曾明,李建勋,基于自适应形态学 Top-Hat 滤波器的红外弱小 目标检测方法[J],上海交通大学学报,2006,40(1):90-97

· 298 ·