

文章编号 1004-924X(2011)04-0908-08

结合统计分布和非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测

刘兴淼, 王仕成, 赵 静

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 在分析存在背景和噪声干扰下的红外小目标检测方法的基础上, 提出了一种时空结合的红外小目标检测算法。首先, 基于相邻帧背景图像灰度值变化的特点, 提出了基于三阶中心矩统计分布确定小目标区域方法, 接着对图像进行非下采样 Contourlet 变换(NSCT), 定义子带的能量系数, 并结合各个子带的能量系数得到各点的能量值, 进而得到一个基于各点能量值的图像。最后, 根据能量图像中小目标、背景及噪声的不同分布特点, 利用阈值分割得到要检测的小目标。仿真实验结果表明, 该方法能较精确地检测出红外小目标, 具有较高的检测率和较小的平均虚警数; 对单一背景和运动背景下的红外小目标进行检测, 其检测率分别达到了 98% 和 97%, 平均虚警数仅为 0.05 和 0.17, 并且在小目标出现快速以及不规则运动时仍能进行有效检测。

关键词: 小目标检测; 非下采样 Contourlet 变换; 统计分布; 红外图像

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0908

Infrared small target detection based on nonsampled Contourlet transform and statistical distribution

LIU Xing-miao, WANG Shi-cheng, ZHAO Jing

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The method to detect small moving targets in infrared image sequences that contain moving nuisance objects and background noises is analyzed in this paper. An infrared small target detection algorithm combined with temporal and spatial domains is put forward. On the basis of the background change slowly, the algorithm firstly confirms the object region based on the third central moments of frame difference, and decomposes the frame difference image by nonsampled Contourlet transform to define the energy coefficients of the sub-band images. Then the image based on the energy value of each pixel is obtained. Finally, the final detecting of the target is realised according to the different features of small targets, backgrounds and noises. The results indicate that the small infrared target detection based on nonsampled Contourlet transform can precisely detect the small infrared target and has better target detection performance. When the small targets with invariable and moving backgrounds are detected, the detection rate of the proposed algorithm can reach 98% and 97% and the mean of false alarm points is only 0.05 and 0.17, respectively. It concludes that the proposed algo-

收稿日期: 2010-05-14; 修订日期: 2010-07-07.

基金项目: 某院重点平台建设项目 (No. WX07233)

rithm can detect the small target when the target has fast or anomalistic movement.

Key words: small target detection; nonsubsamped Contourlet transform; statistical distribution; infrared image

1 引言

红外制导技术在武器装备系统中有着广泛的应用,通过目标所产生的红外辐射尽早地识别并锁定跟踪目标,可以为武器装备争取足够的反应时间。然而,远距离摄取的红外图像一般信噪比较低,目标与背景的对比度差,且目标边缘模糊,使得红外小目标的检测成为目标识别领域的一个难点。

单帧红外小目标检测方法可以分为3类:(1)基于变换域的红外小目标检测方法,常用的变换有小波变换、Contourlet 变换^[1]等。(2)基于背景估计与抑制的检测方法,常用的有高通滤波、中值滤波^[2]、均值滤波以及自适应背景估计等。(3)基于形态学滤波^[3]的红外小目标检测方法。其中,小波分析的多尺度特性使其适合于在低信噪比环境下进行红外小目标检测,其伸缩特性可使部分图像特征在某个尺度下被有效地抑制,而某些感兴趣的特性可以被凸显出来。但是由于二维小波是一维小波的张量积,方向性十分有限,对二维图像只能在水平、垂直和对角3个方向上进行分解,因此将小波分析用于红外小目标检测也有一定的局限性。2002年,Donoho和Vetterli等人在多尺度思想的基础上将拉普拉斯分解与方向滤波器相结合构造出了离散有向多分辨率图像表示方法的Contourlet变换^[4],为解决二维或更高维奇异性提供了一种新的分析工具。这种变换的主要特征是有很好的方向性和各向异性,每个尺度所分解的方向都灵活可变。2006年,Cunha等人又提出了一种完全具备平移不变性的非下采样Contourlet变换^[5](NSCT),针对Contourlet变换的一些局限性进行了改进,解决了传统Contourlet变换不具备平移不变性的不足,是一个平移不变、多尺度、多方向的超完备变换。

文献[6]采用对图像进行NSCT变换,NSCT分解后利用能量法提取图像局部纹理特征的方法实现了对目标的检测,并实验证明了基于NSCT变换的方法要明显优于基于小波变换的方

法。但是,文献[6]中的方法要计算所有像素点的特征向量并且仅仅利用了图像的空域信息导致其具有计算量大且无法有效消除背景亮斑干扰的缺点。考虑到红外小目标图像序列的时域特性,结合NSCT变换的特点,本文提出了一种先利用图像统计信息确定目标区域,然后基于NSCT变换确定小目标位置的红外图像小目标检测算法。

2 非下采样 Contourlet 变换

非下采样Contourlet变换(NSCT)是在Contourlet变换的基础上新近发展起来的一种新的多尺度、多方向变换,其完全平移不变弥补了Do和Vetterli提出的下采样Contourlet变换的不足。NSCT是一种灵活的多尺度、多方向且具有平移不变的图像分解方法,与传统的Contourlet变换相似,它也是首先利用塔式滤波器组对图像进行多尺度分解,然后采用方向滤波器对得到的各尺度子带图像进行分解,从而得到不同尺度、不同方向的子带图像。所不同的是传统的Contourlet变换采用的塔式滤波器组和方向滤波器组在变换过程中都存在下采样操作,造成Contourlet变换不具有平移不变性,而NSCT采用的塔式滤波器组和方向滤波器组是非下采样塔式滤波器组(Nonsubsampled Pyramid Filter Bank, NSPFB)和非下采样方向滤波器组(Nonsample Directional Filter Ban, NSDFB),因此,NSCT在图像的分解和重构过程中,避免了对图像进行下采样和上采样操作,使得NSCT变换在保留传统Contourlet变换具有的特性的同时还具有平移不变特性及各子带图像之间具有相同尺度大小相等的特性。图1为NSCT的分解流程图。

相比小波分解,Contourlet变换和NSCT同样是多尺度多分辨率分解,但Contourlet变换和NSCT同时具有很好的方向性和各向异性,在每个尺度所分解的方向都灵活可变;而相比Contourlet变换,NSCT由于采用非下采样的塔式滤波器组和方向滤波器组,使其变换得到的各个子带中的视觉特征及信息更加完整,同时得到的低

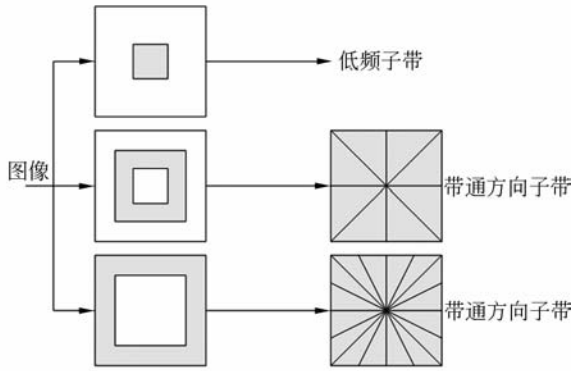


图 1 NSCT 分解流程

Fig. 1 Flowchart of NSCT

频子带不会有频率混淆现象产生,具有更强的方向选择性。

3 检测算法

算法的主要思想为:首先,计算序列图像中相邻两帧对应像素差,得到当前帧差图 f_c ,接着,基于统计的方法检测出 f_c 中的小目标区域,最后,对 f_c 进行 NSCT 变换,根据 NSCT 变换的系数特点在目标区域内进行小目标检测,确定小目标的位置。

3.1 目标区域的确定

红外小目标序列图像的背景图像通常在图像灰度分布空间上有较长的相关长度,它占据了场景图像空间频率中的低频部分。对于大部分探测系统来说是比较固定的场景,或者说在一个时间段内,场景是相对固定的,因此相邻帧之间的背景变化不大^[7]。由于场景和传感器内部热分布的不均匀,背景图像是一个缓慢变换且非平稳的二维随机过程在时间域上,不同差分场景图像的同位置上的像素灰度分布近似呈高斯性,同时在空间域上,差分图像中的背景局部区域也呈高斯分布特性,而当子块中包含小目标时,该块的统计特性就不符合高斯分布^[11]。根据这一原理,文中提出了一种基于统计方法的差分图像目标区域确定方法:首先将差分图像按从左到右,从上到下的空间顺序分成若干个图像子块,接着通过判断各个块是否呈高斯分布来判别该块是否为目标区域块,最后集合所有可能包含小目标的块,确定目标区域。

文中主要采用计算各个子块中心矩,根据中

心矩的取值确定子块是否符合高斯分布的方法,判别子块为目标块还是背景块。根据统计学原理,三阶中心矩和四阶中心矩都能反映出随机变量的分布情况,但是由于四阶矩不适合表征数据值有正有负的差分图像信号,而且相比三阶矩,四阶矩的计算复杂、运算量也较大,因此,文中选用三阶中心矩作为子块统计分布情况的统计量。

$$f_c(x, y, t) = f(x, y, t) - f(x, y, t-1), \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f_c(x, y, t), \quad (2)$$

$$J_3 = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f_c(x, y, t) - \mu)^3. \quad (3)$$

其中, $f_c(x, y, t)$ 为相邻帧子块对应位置的像素灰度差, $f(x, y, t)$ 和 $f(x, y, t-1)$ 分别为当前帧及前一帧图像的对应块在位置 (x, y) 处的像素灰度值, μ 为块均值, J_3 为子块的三阶中心矩, $M \times N$ 为子块大小。

理论上,子块越大越能反映出图像统计分布的特性,判别的效果越准确,但是当子块过大时,小目标可能只是子块的一部分,当整个子块被判为背景块时,就会漏检目标块,导致小目标检测失败。考虑到小目标一般为几个到十几个像素点,因此图像分块时,将差分图像划分为 4×4 或 5×5 大小的方块。通过对大量序列的统计实验结果得到,此时背景块的三阶中心矩取值为 $0 \sim 75$, 目标块的三阶中心矩取值为 $437 \sim 2\ 982$, 两者相差较大,因此在实际实验中,采用阈值为 100, 即三阶矩大于 100 的认为该块不服从高斯分布,里面有目标进入,为目标块,小于 100 的认为该块服从高斯分布为背景块,进而确定整个目标区域。

3.2 基于 NSCT 变换的目标检测

非下采样的 Contourlet 不仅具有多尺度性质,同时也具有几何流和方向性的描述。由于 NSCT 具有平移不变性,所以每个原始图像中的像素对应着变换域中相同位置的系数,因此可以通过 NSCT 系数将图像的几何流信息描述出来。经过目标区域的确定,此时帧差图像的目标区域中主要包含小目标、剩余背景以及部分噪声点,可以把所有的系数分为三类:小目标、剩余背景、噪声。首先,小目标对应着所有子带中的大系数,而剩余背景在某些方向上是大系数,而在相同尺度的其他子带方向上则可能是小系数。但是对于噪声而言,在所有的子带上都对应着小系数。三者

在各个子带系数上的差异就是实现小目标检测的基础。

设 ω_i 为图像经过 NSCT 后某个子带信号中的点 k 的值,定义该点的能量系数为 E_k :

$$E_k = \sum_{i=1}^{n \times n} \omega_i, \quad (4)$$

式中, n 为以点 k 为中心的窗口大小。

求出各个子带像素点的能量系数后,根据下式可得到帧差图像中点 k 的能量值 F_k 。

$$F_k = \sum_{j=1}^l E_k^j, \quad (5)$$

式中, E_k^j 为第 j 个频率分量所对应的 k 点的能量系数, l 为所有频率分量的总和。

根据上式得到帧差图像中各个点的能量值,就可以得到一幅由各个点能量值组成的图像,即能量图像:

$$F = \{F(x, y) \mid x, y \in (m, n)\}, \quad (6)$$

式中, $m \times n$ 为图像的大小。

在帧差图像中,小目标对应着 NSCT 变换所有子带中的大系数,小目标点的能量系数相应地也对应着高能量值,又由于小目标呈钟形分布,在小目标区域的点的系数都是大系数,并且距离小目标点中心越近,该点的系数越大。通过上式中的区域累加能量计算,一来使得小目标的中心点像素值与周围点像素值的差值更加明显,越靠近小目标中心的点,其能量值越大,更有利于对小目标的精确定位;二来也拉大了小目标区域点能量值与背景及噪声的系数能量值的差值,进一步提高了图像的信噪比,为后续的阈值分割打下了良好的基础。

上述过程通过目标区域确定算法,滤除了大部分的背景干扰,确定了小目标所在的区域,接着又利用 NSCT 变换系数中小目标、剩余背景以及噪声的特性,通过能量累积计算,进一步剔除了高灰度值的孤立噪声点对小目标检测的影响,增加了图像的信噪比。经过上述算法的处理,可以保证小目标区域的灰度均值在能量图像中能远远高于其他区域,且在小目标区域中越靠近中心点,图像点的灰度值越大。

为此,文中提出了一种适用于能量图像的阈值分割算法:找出图像中灰度均值最大的区域,认为该区域即是小目标所在区域,并将该区域的均值作为图像的分割阈值,对图像进行分割处理。

该算法中,图像区域选择的大小对最后分割的效果影响很大,若区域太大,阈值处理后,图像中就会引入大量的虚警点,影响小目标的检测;若太小,阈值过大,这样对小目标检测结果就会不完整,同样会影响检测效果。一般来说,该区域的选择主要是根据小目标的大小来确定,由于小目标大多是包含几个到十几个像素点,因此,该区域选择 3×3 或 4×4 的图像区域,即可取得较好的分割效果。

求出分割阈值 T 后,利用阈值 T 对能量图像 F 做二值处理,即高于阈值的为小目标像素点, $f(x, y)$ 即为最终的检测结果:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & F(x, y) > T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (7)$$

4 实验结果及分析

为了验证算法的有效性,利用文中算法对大小为 320×240 的两组红外序列图像(序列图像 I 和序列图像 II)进行小目标检测实验,其中,序列图像 I 为单一背景下的红外小目标图像,序列图像 II 为运动背景下的红外小目标图像。实验中非下采样 Contourlet 变换采用“maxflat”塔形滤波器和“dmaxflat7”方向滤波器,进行二级非下采样 Contourlet 变换。

阈值分割前信噪比改善程度是算法性能优劣的一个衡量标准,定义以下两个评价参数^[9],验证算法的处理效果。

信噪比:

$$SNR = (G_t - G_b) / \sigma, \quad (8)$$

G_t 为局部窗口内目标的最大灰度值, G_b 代表局部窗口内像素灰度均值, σ 为局部窗口内像素灰度标准差。

SNR 增益:

$$G_{SNR} = SNR_0 / SNR_1, \quad (9)$$

SNR_0 为处理后输出图像的 SNR, SNR_1 为输入图像的 SNR。

利用算法对序列图像 I 中第 280 帧图像进行了检测实验,实验前小目标的 SNR 为 2.180 9,经过文中算法的处理,阈值分割前小目标的 SNR 为 22.940 9,SNR 增益为 10.519 0。由此可见文中算法有效地抑制了背景,提高了目标的 SNR,为后续的小目标阈值分割打下了良好的基础。

表 1 为在相同条件下对序列图像 I 中第 280 帧图像进行小目标检测的用时比较。

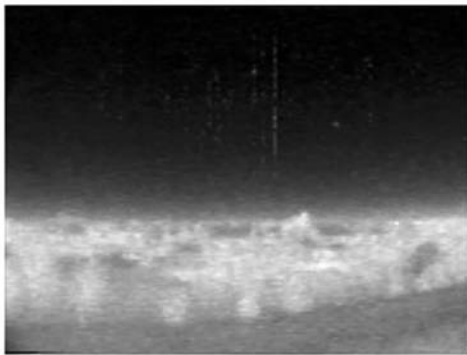
表 1 两种算法运行时间对比

Tab.1 Comparison of two algorithms

时间	文献[6]	文中算法
t	29.516 4	11.708 4

从表 1 中可以看出,文中算法进行一次检测所用时间仅仅为文献[6]中的算法所用时间的1/3多一点,相比较来说,具有更快的运算速度和更高的检测效率。这主要是由于文献[6]在检测时,要进行逐点的特征向量的计算,而文中算法首先进行了目标区域的确定,仅仅对目标区域内的点进行能量值计算,同时文中提出的点能量值计算方法相比文献中的特征点的计算方法要更加简洁,因此相对文献[6]算法,文中算法的运算速度要更快,效率也更高。

图 2(a)为序列图像中第 280 帧图像,图 2(b)



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 文献[6]检测结果
(b) Detection result of Ref [6]



(c) 文中算法检测结果
(c) Detection result of proposed algorithm

图 2 原始图像和小目标检测结果

Fig.2 Original image and detection results

~2(c)是分别采用文中算法和文献[6]算法得到的检测结果。

由检测结果可以看出,文中算法和文献[6]算法都找到目标的位置,检测出了小目标。但是,在检测出小目标的同时,文献[6]中算法还引进了两个虚警点,而文中算法则完全去除了背景亮斑的干扰,同时相比文献[6]算法,文中算法检测出了更多的小目标形状信息,取得了更为优良的检测效果。

为了检验文中算法的检测效果,分别使用文中算法和文献[6]中提出的算法对序列图像 I 和序列图像 II 进行了小目标检测实验,并从检测概率和平均虚警数两方面进行了对比。

定义检测概率 P_d 和平均虚警数 F_a 为^[10]:

$$P_d = N_a / N_b; F_a = N_f / N_l. \quad (6)$$

式中, N_a 为序列图像中检测到的真实目标个数; N_b 为序列中所有真实目标个数; N_f 为序列中检测到的虚假目标个数; N_l 为序列中图像的帧数。

表 2 两种算法检测效果对比

Tab.2 Detection results of two algorithms

	指标	文献[6]	文中算法
序列图像 I	P_d	92%	98%
	F_a	1.8	0.05
序列图像 II	P_d	94%	97%
	F_a	2.6	0.17

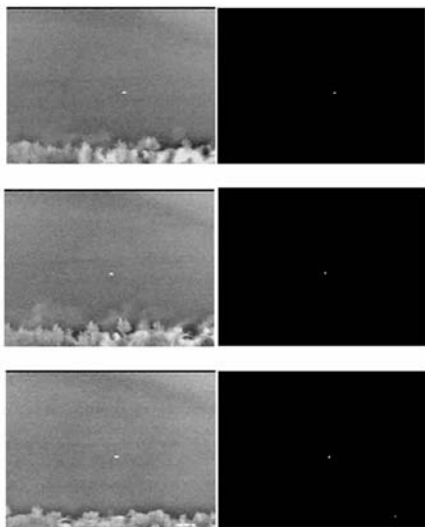


图3 运动背景下文中算法检测结果

Fig. 3 Detection results of moving background

表2为两种算法对分别从序列图像Ⅰ和序列图像Ⅱ中提取的100帧图像进行目标检测得到的检测概率和平均虚警数。图3为序列图像Ⅱ中抽取的几帧图像使用文中算法进行小目标检测的结果。

由表2可以看出,两种算法在单一背景和运动背景下都具有很高的检测概率,证明了文中算法的可行性和有效性。同时,文中算法不管是检测概率还是平均虚警数都优于文献[6]中算法。分析主要原因是文献[6]中的算法仅仅利用了图像的空域信息进行小目标的检测,导致其无法很好地消除图像中孤立亮斑的影响,从而造成虚警点高的缺点。由图3可以得出文中算法在相邻帧背景未发生剧烈变化时可以很好地检测出小目标,在相邻帧发生很大变化时,虽然也可以检测出小目标,但同时也增加了检测的虚警数,这也是检测运动背景时的检测概率与检测单一背景的检测概率基本相同,而平均虚警数却大于单一背景下的平均虚警数的原因。

现有的很多利用空域与时域结合的检测方法都是首先利用空域信息检测出图像的可能小目标点,然后再利用目标运动的连续性和一致性最后确定目标,这样就存在一个缺点:在小目标运动过快或者做无规则运动时,无法对小目标进行有效的检测。而文中算法完全克服了该缺点,这主要是因为文中算法在进行小目标检测时,主要是利用图像的时域信息进行目标区域确定,以去除背

景以及噪声点的干扰,减少计算量,而在空域中进行小目标检测时不是利用目标运动的连续性和一致性确定目标,而是利用小目标在NSCT变换中的频域信息进行目标确定,因此文中算法不敏感小目标的快速或者不规则运动。

由于素材有限,并且文中算法是在相邻两帧图像背景相差不大的前提下得到的结论,因此,文中从序列图像Ⅰ中取相隔十几帧的两帧图像作为相邻的两帧图像,使用文中算法进行小目标检测,用以验证在小目标存在快速或不规则运动时的检测效果。图4为序列图像中的第254帧图像,图5为第268帧图像,图6为将图4和图5看作相邻帧图像进行小目标检测的结果。

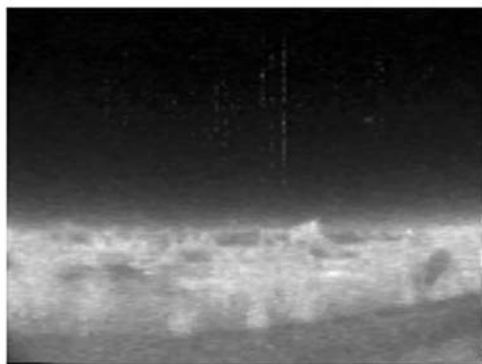


图4 第254帧图像

Fig. 4 Infrared image 254

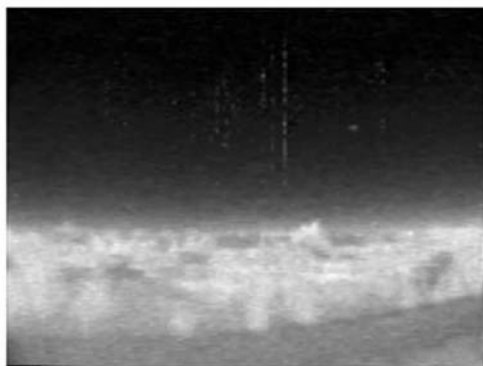


图5 第268帧图像

Fig. 5 Infrared image 268

由实验结果可以看出,使用文中算法仍然准确地检测出了小目标,从而证实了文中算法在小目标出现不规则以及快速运动时仍可以进行有效的检测。



图 6 检测结果

Fig. 6 Detection result

参考文献:

- [1] 吴文怡, 吴一全. 基于 Contourlet 变换的红外弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 136-138.
WU W Y, WU Y Q. Method of infrared dim targets detection based on Contourlet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 136-138. (in Chinese)
- [2] BARNETT J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds[J]. *SPIE*, 1989, 1050:10-18.
- [3] TOM V T, PELI T, LEUNG M. Morphology-based algorithm for point-target detection in infrared backgrounds[J]. *SPIE*, 1993, 1954:2-11.
- [4] DO M N, VETTERLI M. Contourlets; a directional multiresolution image representation [C]. *IEEE Int. Conf on Image Processing, Rochester, September*, 2002, 1:357-360.
- [5] CUNHA L D, ZHOU J P, DO M N. The nonsub-sampled Contourlet transform; theory design and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10):3089-3101.
- [6] 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.
WU Y Q, LUO Z J, WU W Y. A method of small

5 结 论

基于非下采样 Contourlet 变换和红外小目标图像时域特性, 提出一种基于非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测算法。该算法充分利用了红外图像帧间信息和各单帧实时图像的频域信息, 使得整个红外小目标检测过程在一个完整的自适应框架下得以实现。与同类算法相比, 文中算法具有更高的检测概率, 更低的虚警率, 并且可以在小目标出现快速或者不规则运动时仍可以进行有效的检测。

- target detection in infrared image based on nonsub-sampled contourlet transforms[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(3):477-481. (in Chinese)
- [7] 高陈强, 田金文, 王鹏. 基于时域特性分析的红外运动小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5):907-910.
GAO CH Q, TIAN J W, WANG P. Detection algorithm for infrared moving small target based on temporal domain characteristics analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5):907-910. (in Chinese)
- [8] 赵晶晶, 谌海新, 刘星彤. 能量累积与均值漂移聚类结合的红外小目标检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(10):1878-1881.
ZHAO J J, CHEN H X, LIU X T. Small target detection based on method energy accumulation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(10): 1878-1881. (in Chinese)
- [9] 罗军辉, 姬红兵, 刘新. 一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3):209-212.
LUO J H, JI H B, LIU J. Algorithm of IR small targets detection based on spatial filter and its application [J]. *Infrared Millin. Waves*, 2007, 26(3): 209-212. (in Chinese)
- [10] 高陈强, 田金文, 王鹏, 等. 复杂天空背景下基于 GST 的红外斑点小目标检测[J]. 华中科技大学学

报(自然科学版),2009,37(7):10-13.

GAO C Q, TIAN J W, WANG P. Detection of infrared spot small targets against complex sky background by using GST [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2009,37(7):10-13. (in Chinese)

[11] 李波,姚春莲,李炜,等.利用相邻帧和背景信息的

运动对象检测[J]. *电子学报*, 2008(11):2154-2159.

LI B, YAO CH L, LI W, *et al.*. A novel motion object detection algorithm using adjacent frame and background frame [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008(11):2154-2159. (in Chinese)

作者简介:



刘兴森(1981—),男,山东东明人,博士研究生,2004年,2007年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事红外图像处理及目标检测与识别方面的研究。E-mail: liouxm_99@163.com



赵静(1981—),女,陕西西安人,博士研究生,2003年,2007年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事计算机应用方面研究。E-mail: zhaojing_cat@163.com

导师简介:



王仕成(1962—),男,山东单县人,教授,博士生导师,1985年、1988年、1998年于二炮工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为导航、制导与控制、检测技术与自动化装置、图像处理及目标检测与跟踪。E-mail: wshcheng@vip.163.com

●下期预告

异面腔四频陀螺中的模牵引效应及补偿技术

汪之国,龙兴武,王飞

(国防科技大学 光电科学与工程学院光电工程系,湖南 长沙 410073)

为了提高异面腔四频差动激光陀螺(NFMDLG)的精度,提出了采用互易偏频的零偏补偿技术。根据气体激光器经典理论,推导了 NFMDLG 的互易偏频和零偏的表达式。分析了 NFMDLG 中的左旋陀螺分别位于增益曲线左、右侧时其输出零偏的特点,指出磁圆二向色性差损导致的零偏在这两种情况下大小相同符号相反。搭建了一套可同时测量互易偏频和零偏的实验系统,通过改变 NFMDLG 的放电电流和腔体温度验证了理论分析。在此基础上提出利用互易偏频补偿温度和电流变化导致的零漂的方案。实验结果表明,温度变化 50 °C 时采用该补偿方法后零偏在 ±0.01 Hz 内波动,放电电流变化 0.2 mA 时补偿后的零漂降低了 4/5。因此互易偏频可有效补偿模牵引效应导致的零偏误差。