

文章编号 1004-924X(2011)08-1950-07

采用多尺度隐式马尔可夫模型的红外图像背景抑制

秦翰林^{1*}, 周慧鑫¹, 刘群昌², 赖睿³

(1. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国航天科工集团公司九院总体设计部, 湖北 武汉 430035; 3. 西安电子科技大学微电子学院, 陕西 西安 710071)

摘要:提出了一种基于多尺度隐式马尔可夫模型的红外图像背景抑制方法来解决红外弱小目标检测技术中复杂背景干扰的问题。根据红外目标和背景杂波所具有的不同统计分布特性,利用剪切波变换分解后各尺度、各方向子带内和子带间的系数之间的关系,建立了基于剪切波变换的多尺度隐式马尔可夫模型。通过期望最大化算法计算最优背景参数,分离红外图像中弱小目标信号和复杂背景杂波,达到抑制背景、保存并增强目标信号的目的。对真实的和模拟的包含弱小目标的红外图像序列进行了实验验证,实验结果表明,与最大中值滤波和局部去均值两种方法相比较,本文方法对红外弱小目标($SCR \geq 1.6$)的复杂背景从主观视觉和数值指标上都具有良好抑制效果。

关键词:红外图像;目标检测;背景抑制;剪切波变换;隐式马尔可夫模型

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111908.1950

Suppression of infrared image background by multiscale hidden Markov model

QIN Han-lin^{1*}, ZHOU Hui-xin¹, LIU Qun-chang², LAI Rui³

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Ninth System Designing Institute of China Aerospace Science & Industry Corporation, Wuhan 430035, China;

3. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

* Corresponding author, E-mail: hlqin@mail.xidian.edu.cn

Abstract: A background suppression method based on multi-scale Hidden Markov Mode (HMT) was proposed to remove the complex background clutter in the detection of dim and small targets. According to difference of distributed characteristics between target and background clutter in infrared image, the shearlet transform based multi-scale HMT was estimated by using the different scale and direction relation of inter-scale and cross-subband coefficients of decomposed images. Finally, the expectation-maximization (EM) algorithm was used to calculate the background, separate dim and small targets and background clutter of infrared image and to implement the suppression of background, and the preservation and enhancement of target signals. Compared with Max Median (MMed) and Local Means Remove (LMR) filter from subject inspection and value index, several groups of experimental results demonstrate that the proposed method can suppress the complicated background in dim and

收稿日期:2010-11-02;修订日期:2011-01-04.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(No. 72005623, No. 72104810);国家部委科技项目资助项目(No. 7130721);教育部科学技术研究重点项目(No. 108114);国家自然科学基金资助项目(No. 60902080)

small target images effectively($SCR \geq 1.6$).

Key words: infrared image; target detection; background suppression; shearlet transform; hidden Markov model

1 引言

红外成像系统因为具有隐蔽性好、抗干扰能力强、角分辨率高和可全天时工作等诸多优点,已被广泛地应用于多种武器装备系统中。近些年来,随着电子对抗领域要求的不断变革和提高,尽早、尽快发现目标成为决定未来战争胜负的一个举足轻重的因素,因此,复杂背景下红外弱小目标的检测和跟踪已成为精确制导、火力控制和侦察告警等系统中的关键技术问题。可靠、稳定、准确地检测并跟踪这类包含在复杂背景中的弱小目标,必须对图像进行预处理,而高性能的背景抑制是其中关键的环节。

近十几年来,红外图像背景抑制技术得到较大的发展,主要有局部去均值滤波^[1]、最大中值/均值滤波^[2]、改进的偏微分方程法^[3]、张量投影^[4]、二维最小均方滤波^[5]、二次相关滤波^[6]和动态规划^[7-9]等空域和时域方法。这些常见的红外目标背景抑制方法,满足了弱小目标检测领域的一些需求,然而,上述方法对强杂波适应性不强,特别是仅能对天空云层、地面路网和人工建筑物等复杂背景中的某一类适应性较好,但是,在现代战场环境中,当车载、弹载和机载等红外成像系统面临不同类型的复杂背景时,会出现检测概率的降低和虚警概率增大等现象。在这种情况下,为了使有用的目标特征被保留并得到有效增强,则必须要对复杂背景实行自适应的抑制。

基于上述需求,本文在利用多尺度几何分析中较新的剪切波变换理论对图像进行多尺度和多方向分解的基础上,构造了一种基于多尺度隐式马尔可夫模型的红外弱小目标背景抑制新方法,将剪切波变换和隐式马尔可夫模型相结合来有效平滑掉非结构化复杂背景,保存并增强其突变部分,即目标信号。用真实的和模拟的红外图像序列进行实验,有效地抑制图像中的背景杂波,突出目标图像,提高信杂比,验证了本方法的良好性能。

2 基于隐式马尔可夫模型的弱小目标背景抑制

2.1 剪切波变换

各向异性小波变换虽然不能提供关于 f 奇异性集合的附加信息,但在许多应用中,其对辨识奇异性的位置和几何特征(比如不连续曲线的方向)有用。因此需要考虑将各向异性小波变换与更多的群联系起来。特别是采用式(1)定义的连续剪切波变换^[10]来定义此映射。

$$SH_{\psi} f(a, s, t) = \langle f, \psi_{ast} \rangle, a > 0, s \in \mathbf{R}, t \in \mathbf{R}^2, \quad (1)$$

式中, $\psi_{ast}(x) = |\det \mathbf{M}_{ax}|^{-\frac{1}{2}} \psi(\mathbf{M}_{as}^{-1}(x-t))$, $\mathbf{M}_{as} = \begin{bmatrix} a & s \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}$, 每个矩阵 \mathbf{M}_{as} 可被看成 $\mathbf{B}_s \mathbf{A}_a$, 其中, $\mathbf{B}_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 是一个剪切(shear)矩阵, $\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}$ 为各向异性膨胀矩阵。选择合适的分解函数,对 $\xi = (\xi_1, \xi_2) \in \mathbf{R}^2, \xi_2 \neq 0$, 则 ψ 可由式(2)给定。

$$\hat{\psi}(\xi) = \hat{\psi}(\xi_1, \xi_2) = \hat{\psi}_1(\xi_1) \hat{\psi}_2\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right). \quad (2)$$

式中, $\hat{\psi}_1 \in L^2(\mathbf{R})$ 满足 Calderon 条件,即

$$\int_0^{\infty} |\hat{\psi}_1(a\xi)|^2 \frac{da}{a} = 1, \xi \in \mathbf{R} \quad (3)$$

且 $\|\psi_2\|_{L_2} = 1$, 然后对每一个 $f \in L^2(\mathbf{R}^2)$, 有

$$f = \int_{\mathbf{R}^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} \langle f, \psi_{ast} \rangle \psi_{ast} \frac{da}{a^3} ds dt. \quad (4)$$

由此可见剪切波变换是由尺度 a 、剪切 s 和平移 t 三个变量构成的函数。因此,剪切波不仅可以定义奇异点的位置,而且可以自动跟踪奇异曲线。剪切波具有如下特性:(1)局部化特性非常好;(2)满足抛物线尺度化,体现了很强的方向敏感性;(3)空间局部化;(4)具有最优的稀疏表示。

剪切波变换的基本过程如图1所示,具体步骤如下:

(1)应用拉普拉斯金字塔算法,把 f_a^{-1} 分解

成一个低通滤波后的图像 f^l 和一个高通滤波后的图像 f^h ;

(2) 在伪极化格上计算 \hat{f}_a^l , 产生矩阵 Pf_a^l ;

(3) 应用带通滤波器于矩阵 Pf_a^l ;

(4) 直接重新定义 Cartesian 抽样值, 应用逆向二维 FFT 计算, 得到剪切波系数。

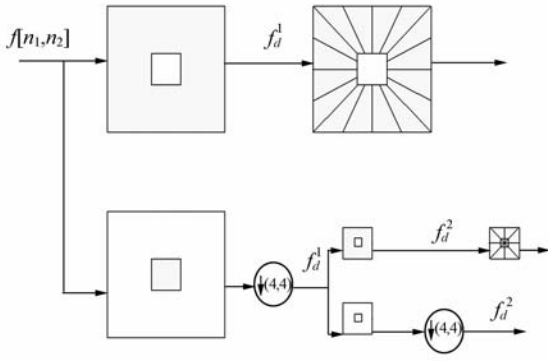


图 1 剪切波变换流程图

Fig. 1 Scheme of shearlet transform

空中红外运动弱小目标图像由目标、背景(主要指天空、云层、地形、路网和地面建筑等)和红外成像器的电子噪声构成。其中,具有云层反射的复杂背景在空间上有缓变部分,也有剧变部分,背景是在时间上体现为缓变。因此,图像中的目标即使在整幅图像中强度不是最强的,但在它所处的小区域中与局部背景的差异较明显,一般要高于局部背景的辐射强度,另一方面,背景中强度较高的像素虽然灰度值较大,但在它所处的局域中与周围背景无明显差异。对原始包含弱小目标的红外图像进行剪切波变换后,由于它的多尺度和多方向特性,使得只有少数的系数具有较大的值,同时系数之间的相关性远远小于原始信号数据的相关性,因此可通过调整分解后各子带的系数值,在剪切波域实现对背景信号的抑制。而隐式马尔可夫模型(HMT)通过一组概率分布将观察数据与其状态联系起来,因而是一个双重随机过程:其中一重过程为马尔可夫链,用于描述状态之间的转移概率;另一重过程用于描述状态值和观察值之间的统计关系,小波和轮廓波域^[11-12]的 HMT 将子带系数的非高斯分布特性和尺度间系数的持续性融为一体,有效地描述了子带系数的联合统计特性。本文将 HMT 框架引入到剪切波域中,提出了一种红外图像弱小目标背景抑制方法。

2.2 多尺度隐式马尔可夫模型

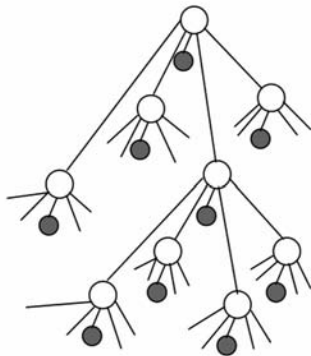
一个完整的 HMT 模型需要指明 N, M, π, A, B 五个参数,分别表示 HMT 中的状态数目、每一状态对应的观察数据数目、初始状态的概率向量、状态间的转移概率矩阵和观察值概率矩阵。为方便起见,通常用符号 $\lambda = (A, B, \pi)$ 表示一个具体的 HMT 参数集。

剪切波变换的压缩特性表明:信号采用剪切波变换后系数往往呈现稀疏性分布,即剪切波域包含着少量的“大系数”和大量的“小系数”。同样,在剪切波域 HMT 模型中,每个系数的非高斯边缘分布也都通过高斯混合模型来建模。这样,每一个独立的系数要么处于“大状态”——对信号能量的贡献较大,要么处于“小状态”——几乎不包含信号能量。如果将每一种状态与相应的概率密度函数相关联,则大方差、零均值的概率密度函数对应于“大, L ”状态;小方差、零均值的概率密度函数对应于“小, S ”状态;那么每个小波系数变量可以通过一个两状态的高斯混合模型来描述。该模型由每一系数对应状态的概率质量函数 $P_s(L)$ 、 $1 - P_s(L)$ 以及每一状态对应的高斯概率密度函数的均值 μ_s, μ_L 和方差 (σ_s^2, σ_L^2) 组成。

通常,一个亮状态由图 2 可以看出,剪切波变换分解结构示意图中每一尺度和方向子带都有一个如图 2(a)所示的四叉树结构。对于这种结构,人们指出:一种树型结构的 HMT 模型——隐马尔可夫树模型,其中白点代表每一系数所对应的“隐”状态变量 S ,黑点代表剪切波系数随机变量 M ,能够有效地描述尺度间剪切波系数的延续性。在剪切波变换域,每个尺度可以分为 2^{N+1} 个子带,因此 ST-HMT 模型中四叉树的结构具有更大的灵活性,尺度间剪切波系数状态的传递可以通过单方向(见图 2(b))和多方向(见图 2(c))两种方式进行。前者表示系数的状态在同一方向子带内进行,后者表示系数的状态传递在尺度间相关的方向子带进行。该模型中父子节点的依赖程度与尺度之间对应系数状态的传递能力相对应,而这种传递能力可通过 HMT 模型中父子节点状态间的概率转移关系得到。

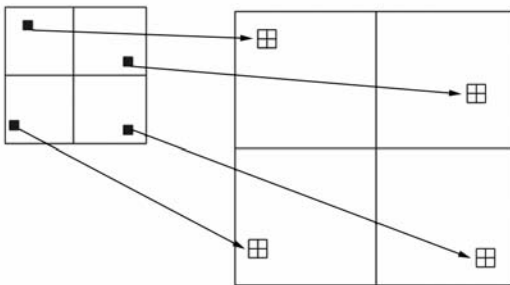
当采用两状态(“大, L ”和“小, S ”)的高斯混合模型描述单个系数变量时,所对应的剪切波 HMT 模型的参数设置如下:

(1) $P_{S_1}(m)$ 为每棵四叉树的根节点 S_1 的概



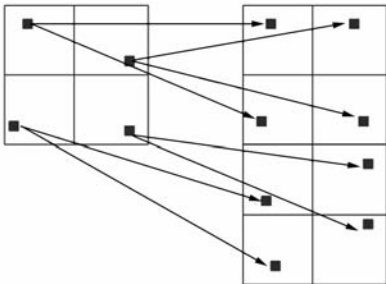
(a) 二维 HMT 模型的四叉树结构

(a) Quadtree structure of 2D HMT model



(b) ST-HMT 模型树的单方向传递

(b) One directional transmit of ST-HMT model



(c) ST-HMT 模型树多方向传递

(c) Multi-directional transmit of ST-HMT model

图 2 ST-HMT 模型和系数的尺度间传递

Fig.2 ST-HMT model and coefficients transmit in-tra-scale

率质量函数,其中 $m \in \{S, L\}$;

(2) $\epsilon_{i, \rho(i)}^{mr} = P_{S_i S_{\rho(i)}}(S_i = m | S_{\rho(i)} = r)$ 为假定父系数状态 $S_{\rho(i)}$ 为 r ,子系数状态 S_i 为 m 的概率,其中, $m, r \in \{S, L\}, i \in \{1, 2, \dots, P\}$ 表示每棵四叉树上系数的索引标记;

(3) $\mu_{i, m}, \sigma_{i, m}^2$ 分别表示节点状态为 m 时,系数变量 W_i 的均值和方差。

将上面 3 个参数组合在一起,可构成参数向量,即

$$\Theta = \{P_{S_i}(m), \epsilon_{i, \rho(i)}^{mr}, \mu_{i, m}, \sigma_{i, m}^2 | i \in \{1, 2, \dots, P\}; m, r \in \{S, L\}\} \quad (5)$$

对于图像这种二维信号,需要在各个子带方法上分别建立相应的 HMT 模型,分别对应各子带的 HMT 模型参数集,其具体形式与 Θ 相同。对于参数的估计,可采用基于最大似然性准则的期望最大化算法^[9]加以解决,从而可获得估计的背景子带系数图像,最后采用逆剪切波变换得到预测的背景图像,将其与原始图像相减可得目标残差图像。

3 实验结果及分析

为了验证上述红外弱小目标背景抑制方法的可行性,利用实际的包含弱小目标的红外成像图像序列进行实验,并和 MMed 和 LMR 两种方法进行了比较。

选取的红外序列分别包括天空云层、地势起伏和地面路网以及人工建筑物等几种典型的背景杂波。基于 CPU 为酷睿二代 2.66 GHz,内存为 2 GB 的 PC 机,基于 Matlab 7.0 软件平台完成仿真实验。其中剪切波分解层数 $N=3$ 。

本实验选取了 3 组包含弱小目标的典型红外图像序列来验证 ST-HMT 方法的性能和鲁棒性。图 3 给出了 3 组实验结果图。图 3(a1~a3)分别为各从 3 组序列中随机选取的一帧原图,它们分别包含了天空复杂云层、野外地面以及地空探测系统中可能出现的地面人工建筑物等复杂背景干扰。图 3(b1~b3)为采用 MMed^[4]的处理效果,图 3(c1~c3)为 LMR^[1]方法的处理效果,图 3(d1~d3)为 ST-HMT 方法的处理效果。实验中采用文献[13]参数对实验结果进行量化比较,如表 1 所示,其中 SCR_m 为原图的信杂比, CR_m 表示原图的对比度, $ISCR$ 表示背景抑制后图像的信杂比增益, ICR 为背景抑制后图像的对比度增益, BSF 表示背景抑制因子, EST 为处理时间(单位为 s)。

采用 MMed 和 LMR 方法处理后,目标虽然被增强,但同时背景的强边缘也得到加强。例如图 3(a)中的云层、地势起伏和地面路网、地空探测系统中可能出现的地面人工建筑物边缘没有被

较好地抑制,从而产生了“虚假轮廓”现象,这必然影响到后续的检测和跟踪等处理环节。而采用 ST-HMT 法处理后,在很好地保存并增强弱小目标信号的同时较好地抑制了复杂背景。特别在目标受到大面积地面路网和地势起伏、云层以及人工建筑物干扰的情况下,与 MMed 和 LMR 方法

结果相比较,ST-HMT 方法不但平滑了复杂背景内部,而且将复杂背景的边缘平滑掉,使得图像整体对比度和信杂比得到了很大的改善,同时很好地分离了背景和目标的灰度值。性能参数比较的结果如表 1 所示,各项参数显示 ST-HMT 法都明显高于 LMR 和 MMed 方法。

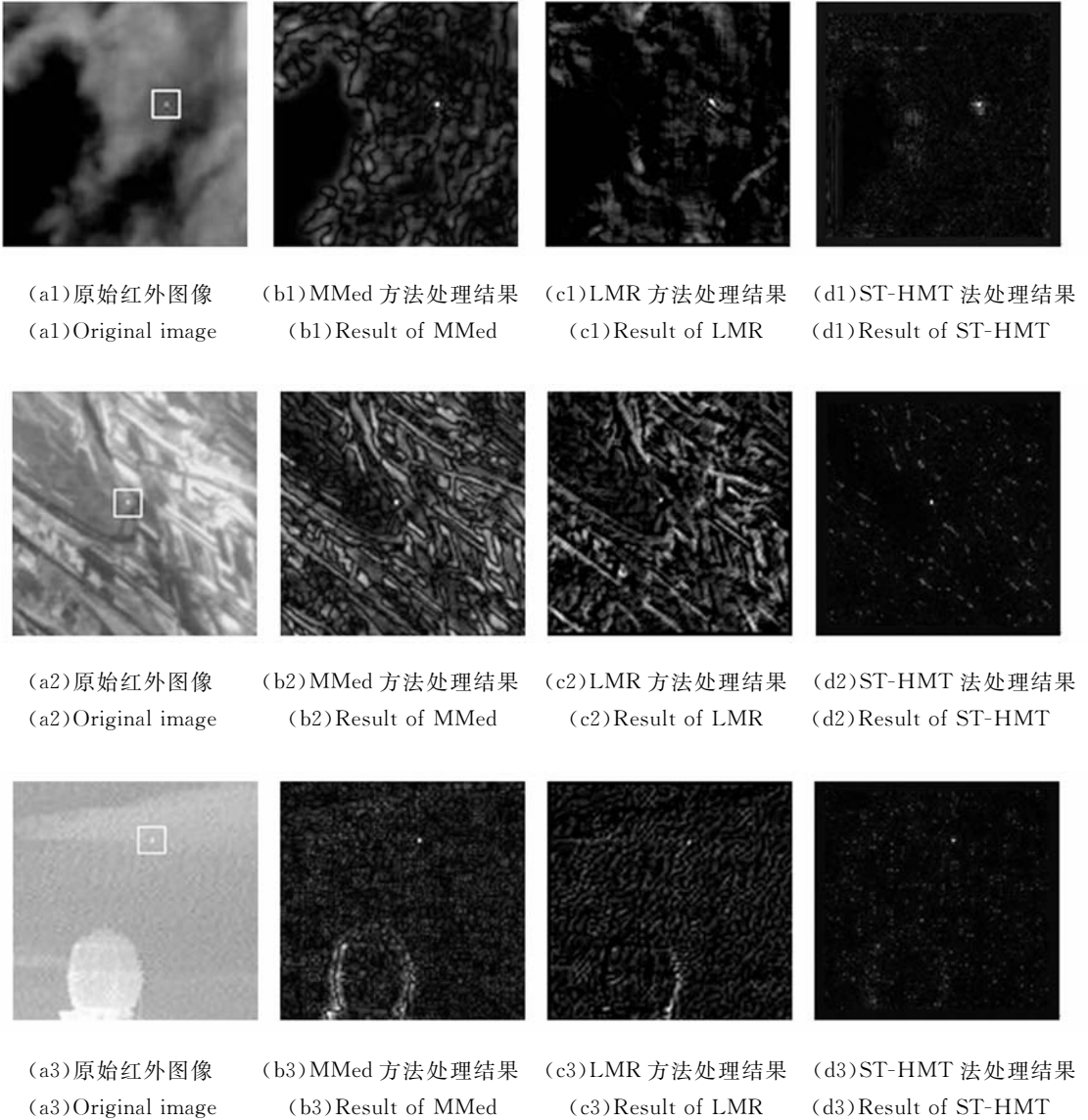


图 3 ST-HMT 方法和二维最小均方误差滤波方法背景抑制性能比较

Fig. 3 Performance comparison of background suppression by the proposed ST-HMT with Mmed,LMR methods

表 1 不同方法性能比较

Tab. 1 Performance comparison of different methods

Original information	MMed						LMR				ST-HMT			
	index	SCR _m	CR _m	ISCR	ICR	BSF	EST	ISCR	ICR	BSF	EST	ISCR	ICR	BSF
a1	2.47	15.59	3.14	21.35	6.33	1.24	2.96	3.83	3.16	0.66	3.71	23.08	6.84	0.88
a2	1.93	13.71	2.65	7.20	2.80	1.23	2.79	3.41	2.68	0.66	3.21	8.94	3.51	0.87
a3	2.08	3.67	3.23	25.35	6.01	1.25	2.55	17.46	4.22	0.67	3.32	27.91	6.68	0.88

4 结 论

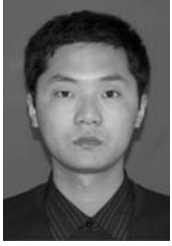
本文提出了一种新的基于剪切波变换的多尺度隐式马尔可夫模型弱小目标背景抑制方法,该方法利用剪切波变换的多尺度和多方向表达特性,并通过分析子带间系数的统计关系,建立了剪切波变换隐式马尔可夫模型,最终实现了对弱小目标复杂背景的背景抑制。理论分析和真实及模拟

的红外图像序列实验验证表明,对 $SCR \geq 1.6$ 的红外弱小目标信号,该方法较好地抑制了高频杂波和复杂背景,保存并增强了目标信号。不足之处是剪切波变换的分解层数不同,对背景抑制的结果影响较大。因此,如何根据不同类型背景自适应选择分解层数是下一步需要研究的问题;同时,由于多尺度隐式马尔可夫模型方法的计算量较大,构建相应的软硬件实时实现平台也是进一步努力的方向。

参考文献:

- [1] CHEN J Y, REED I S. A detection algorithm for optical targets in clutter[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(1): 46-59.
- [2] DESHPANDE S D, ER M H, VENKATESWARLU R, et al.. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[J]. *SPIE*, 1999; 3809: 71-83.
- [3] ZHANG B Y, ZHANG B Y, ZHANG T X, et al.. Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. *SPIE Optical Engineering*, 2007, 46(10): 106401-1-6.
- [4] LI H, WEI Y T, LI L Q. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2010, 53(2): 77-83.
- [5] LIN J N, NIE X, UNBEHAUEN R. Two-dimensional LMS adaptive filter incorporating a local-mean estimator for image processing [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst., II: Analog Digital Signal Process*, 1993, 40(7): 417-428.
- [6] WANG X, LIU L, TANG ZH. Infrared dim target detection based on fractal dimension and third-order characterization[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(10): 931-933.
- [7] 孟祥龙, 张伟, 丛明煜, 等. 天基红外图像的点目标检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2094-2010. MENG X L, ZHANG W, CONG M Y, et al.. Detection of point targets in space-based infrared image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2094-2010. (in Chinese)
- [8] 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.. Energy accumulation in infrared point target detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
- [9] 王学伟, 王春歆, 张玉叶, 等. 空间小目标动态规划检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 477-484. WANG X W, WANG CH X, ZHANG Y Y, et al.. Detection of small space target by dynamic programming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 477-484. (in Chinese)
- [10] GUO K, LABATE D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets[J]. *SIAM J. Math Anal.*, 2008, 39(1): 298-318.
- [11] CROUSE M S, NOWAK R D, BARANIUK R G. Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(4): 886-902.
- [12] PO D D Y, DO M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6): 1610-1620.
- [13] 秦翰林, 刘上乾, 周慧鑫. 采用 Gabor 核非局部均值的弱小目标背景抑制[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 737-741. QIN H L, LIU SH Q, ZHOU H X. Background suppression for dim small target with Gabor kernel non-local means[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 737-741. (in Chinese)

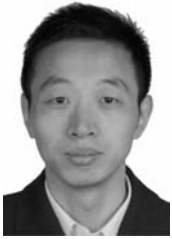
作者简介:



秦翰林(1982—),男,陕西富平人,博士,讲师,2004年、2010年于西安电子科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电计算成像及其信号处理等方面的研究。E-mail: hlqin@mail.xidian.edu.cn



刘群昌(1984—),男,陕西安康人,硕士,助理工程师,2008年、2011年于西安电子科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事光电图像处理等方面的研究。E-mail: qunchang_xidian@163.com



周慧鑫(1975—),男,江西德兴人,博士,副教授,1996年、2002年、2004年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光电成像及图像实时处理、光电对抗等方面的研究。E-mail: hxzhou@mail.xidian.edu.cn



赖睿(1980—),男,重庆人,博士,副教授,1996年、2002年、2004年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事红外超分辨率成像等方面的研究。E-mail: rlai@mail.xidian.edu.cn

●下期预告

动载体光电平台视轴稳定精度的检测

孙辉,郎小龙,李志强,孙丽娜

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

提出一种动载体光电平台视轴稳定精度检测方法。简要介绍了光学测量原理,重点讨论光电平台视轴稳定精度检测系统的实施路线,对该系统使用的自准直光学成像系统、高速数字 CMOS 相机和光斑检测算法进行研究。通过安装在光电平台照准架上的平面反射镜反映光电平台视轴指向的角度变化,使用高速数字 CMOS 相机采集图像,通过计算图像之间归一化的互功率谱,采用相位相关配准算法检测光斑的亚像素级位移量,实现光电平台视轴指向角度的精确测量。该方法已应用于光电平台视轴稳定精度检测系统中,通过 Leica 经纬仪标定实验,结果表明,在视场检测范围 $\pm 1^\circ$ 、图像采样频率 500 frame/s 时,检测误差 $< 2 \mu\text{rad}$ 。该方法实现了动态测量,满足高精度、大视场的检测要求。