

时变复杂背景自由运动目标的高灵敏追迹成像*

许明伟¹⁾²⁾³⁾ 杜康¹⁾²⁾³⁾ 李可²⁾ 王飞翔²⁾ 肖体乔^{1)2)3)†}

1) (中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

2) (上海光源科学中心, 中国科学院上海高等研究院, 上海 201204)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2023年3月10日收到; 2023年5月6日收到修改稿)

复杂背景下低可见度目标追迹是成像领域的一个重要研究方向, 现有方法难以对运动方向和速率均无规则变化的低可见度目标进行追迹成像. 运动衬度成像可大幅提升目标追迹的灵敏度, 已在 X 射线成像领域取得重要应用, 但仅局限于固定轨迹或单调背景的成像. 本文将运动衬度成像引入到时变复杂背景中轨迹不确定的目标追迹成像任务, 通过解决现有方法受复杂背景和高频噪声干扰严重的问题, 实现目标的高灵敏追迹成像. 天空和树林中飞鸟的追迹结果表明, 该方法能有效地消除野外自然光和树叶无规则摆动导致背景灰度无规则变化的影响, 实现时变复杂背景中自由运动弱信号小目标的高灵敏追迹成像. 本文发展的方法有望为低可见度目标追迹成像提供一种新的手段.

关键词: 高灵敏追迹成像, 运动衬度成像, 时变复杂背景, 低可见度目标追迹**PACS:** 07.05.Pj, 43.60.Gk, 42.30.Va, 43.60.Hj**DOI:** 10.7498/aps.72.20230360

1 引言

自然界中存在着各种各样的复杂体系, 这些复杂体系往往包含错综复杂的组分和相对运动. 通常来说复杂体系下目标的运动会与背景运动相混叠, 直接成像会不可避免地引入运动伪影. 对运动检测来说, 一个简单有效的解决办法是通过检测相邻帧内的像素信息来区分感兴趣目标和动态背景噪声, 从而消除背景对目标追迹的干扰^[1], 这类方法的典型代表是时空多通道聚类法^[2]、帧间差分法^[3,4]、光流法^[5,6]以及后两者的结合^[7,8]. 这类算法在强信号大目标运动追迹中取得了良好的效果, 但是当目标小至仅占几个像素且信号较弱时, 复杂的环境和探测器噪声使图像衬度降低, 这些方法便难以奏效. 针对这个问题, 近年来发展出了单帧检测和图像序

列检测两大类低可见度目标检测算法. 一个典型的单帧检测算法中, 通过判断图像局部灰度包络曲面是否具备二维高斯函数曲面特征实现对弱小目标的检测^[9]. 图像序列检测算法中, 采用高斯差分滤波器 and 聚类法实现目标和复杂背景的分离^[10]; 将高通滤波和自适应门限分割相结合的方法检测快速运动的低信噪比目标^[11]; 基于二维最小均方滤波器的背景抑制处理与基于邻域灰度差分的目标增强相结合, 提高复杂背景下空载成像设备对低可见度目标的探测能力^[12]; 将小波变换降噪和基于核理论的点移动目标检测算法相结合, 提升低可见度目标的检测能力^[13]. 在多帧检测思想的基础上, 遥感领域发展出了包括 Hough 变换^[14]、动态规划^[15]、多级假设检验^[16]和粒子滤波^[17]等一系列检测前跟踪 (track before detect, TBD) 算法. 以上这些算法均基于时空域的灰度图像进行工作, 抗噪

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2022YFA1603601, 2021YFF0601203, 2021YFA1600703) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 12205361) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tqxiao@sari.ac.cn

能力较弱,并且在检测高机动目标时效果不理想.基于三维匹配滤波器的检测前跟踪算法由于在傅里叶频域空间工作,具有更强的抗噪能力,但只能跟踪已知速度的匀速直线目标,且速度窗很窄,一旦发生速度失配便难以得到有效的成像结果^[18,19].综上所述,现有方法难以实现运动方向和速率均无规则变化的低可见度小目标的追迹成像.

作为一种对运动具备高灵敏特性的成像方法,运动衬度成像 (move contrast imaging, MCI) 原则上适用于所有波段.该方法基于阵列探测器时序图像中像素点灰度值随时间变化的频率特性进行工作,将运动信号在时域频谱中的衬度映射到实空间实现运动目标的追迹成像.已有研究表明,X射线运动衬度成像可大幅降低血管造影中造影剂的剂量^[20],实现植物维管束水重填充过程的无造影剂成像^[21]和电解池氧化还原反应离子迁移成像^[22],但目前仅限于运动轨迹确定或单调背景的成像.对于复杂背景中运动轨迹不确定的目标,由于其频谱能量与环境频谱能量深度混叠,已有的运动衬度成像方法无法直接用于时变复杂背景中自由运动目标的追迹成像.本文拟通过改进、优化运动衬度成像中的非平稳信号时域频谱分析方法,消除背景信号、速度矢量随机变化对感兴趣目标追迹成像的干扰,实现时变复杂背景下自由轨迹运动目标的高灵敏追迹.

2 原理和方法

自然光照环境下的目标追迹成像通常面临背景复杂、环境干扰随机等影响,如远空或树林中的飞鸟成像等,时变复杂背景会严重影响感兴趣目标的追迹成像灵敏度.复杂背景和高频噪声导致的成像灰度变化一般表现为高频时变信号,而当感兴趣目标经过某一点时,将会引起该点灰度值发生突变,随后便又恢复正常,这是典型的非平稳信号.傅里叶变换在整个时域上进行积分,其频谱不包含时间变量,仅适用于平稳信号的频谱分析.因此,已有基于傅里叶变换的运动衬度成像 (Fourier transform-move contrast imaging, FT-MCI) 在目标追迹中会不可避免地产生非目标组分伪影.采用兼具时间分辨和频率分辨能力、可实现非平稳信号识别的时域频谱分析方法,如小波变换、希尔伯特-黄变换等,是实现时变复杂背景下自由运动目标运动衬

度追迹成像的关键.

2.1 小波变换运动衬度成像

小波变换通过采用多种可平移和伸缩的小波函数作为基,兼顾时间分辨和频率分辨,适用于对时域信号展开时频联合分析.将小波变换与运动衬度成像相结合,有可能解决时变复杂背景中自由运动目标追迹成像信噪比低的难题.小波基对信号的拟合过程实际上是频域的滤波操作,由卷积定理可知频域滤波对应于时域卷积.原始图像 (x, y) 处灰度时序信号 $g(x, y, t)$ 的小波变换为^[23]

$$W(x, y; a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y, t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

其中 $\frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为小波基函数, a 为尺度缩放因子, b 为时间平移因子.通过改变 a 和 b 的值可以实现对小波波形的拉伸压缩和沿时间轴的平移,从而获得信号的时频分布. $g(x, y, t)$ 是以 f_s 的采样率得到的离散值,所以 $t = N/f_s$, $b = k/f_s$, 其中 N 代表用于重构的图像序列长度, k 代表当前图像的帧数. (1) 式可以写成离散化形式^[24]:

$$W(x, y; a, k/f_s) = \frac{1}{f_s \sqrt{a}} \sum_{k=0}^{N-1} g(x, y, N/f_s) \psi^* \left[\frac{(N-k) f_s}{a} \right]. \quad (2)$$

通过 (2) 式可以得到 a 尺度下原始信号与小波基的相关程度,即时域灰度分布与伪频率 f 的相关程度随时间的变化.伪频率与尺度因子的关系为

$$f = f_s \cdot f_{wa}/a, \quad (3)$$

其中 f_{wa} 为 a 尺度下小波基的中心频率,大的尺度因子对应于低频成分,小的尺度因子对应于高频成分.因此 (x, y) 点时域信号的连续小波变换为

$$W(x, y; f, k/f_s) = f_s^{-\frac{3}{2}} \sum_{f=f_0}^{f_n} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{\frac{f}{f_{wa}}} g(x, y, N/f_s) \psi^* \left[\frac{(N-k)f}{f_{wa}} \right]. \quad (4)$$

其中 $[f_0, f_n]$ 为伪频率的通带区间.通过小波变换能得到信号的时频图,在时频图上可以明确看到不同频率成分出现的时间和能量.基于此,小波变换运动衬度重构需要在二维时频图上筛选目标成分,通带区间取时频域最大衬度时的 $[f_{LP}, f_{HP}]$,对时频图进行带通滤波即可获得 k/f_s 时刻的小波变换运动衬度成像 (continuous wavelet transform-move

contrast imaging, CWT-MCI) 结果:

$$I_{\text{CWT}}(x, y; k/f_s) = f_s^{-\frac{3}{2}} \sum_{f=f_{\text{LP}}}^{f_{\text{HP}}} \Re \left\{ \sqrt{\frac{f}{f_{\text{wa}}}} g(x, y, k/f_s) \psi^* \left[\frac{(N-k)f}{f_{\text{wa}}} \right] \right\}, \quad (5)$$

其中 \Re 代表复数的实部.

2.2 希尔伯特-黄变换运动衬度成像

傅里叶变换和小波变换均利用先验基与时域信号进行卷积运算实现时频域的转换, 但先验基函数难以实现对含有突变项的非平稳信号的精确拟合. 黄锷认为任何复杂信号都可经过经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 获得若干个固有模态函数 (intrinsic mode functions, IMFs) (附录 A)^[25], IMFs 反映了信号的内在振荡模式^[26]. 原始信号 $g(x, y, t)$ 可经 EMD 分解为^[25]

$$g(x, y, t) = \sum_{i=1}^n c_i(x, y, t) + r_n(x, y, t), \quad (6)$$

其中 $c_i(x, y, t)$ 是 IMFs, $r_n(x, y, t)$ 是残差项. 对每一个 IMFs 应用希尔伯特变换^[27]:

$$\hat{c}_i(x, y, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(x, y, \tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (7)$$

原始信号就可以表示成解析信号:

$$z_i(x, y, t) = c_i(x, y, t) + j\hat{c}_i(x, y, t). \quad (8)$$

则 $z_i(x, y, t)$ 的振幅和相位为

$$a_i(x, y, t) = \sqrt{c_i^2(x, y, t) + \hat{c}_i^2(x, y, t)},$$

$$\varphi_i(x, y, t) = \arctan \frac{\hat{c}_i(x, y, t)}{c_i(x, y, t)}. \quad (9)$$

瞬时频率可通过对相位求微分获得

$$f_i(x, y, t) = d\varphi_i(x, y, t)/dt. \quad (10)$$

时域信号的希尔伯特-黄变换时频分布为^[28]

$$H(x, y; f, t) = \Re \left\{ \sum_{i=1}^n a_i(x, y, t) e^{j \int f_i(x, y, t) dt} \right\}, \quad (11)$$

其中 \Re 代表复数的实部. 用于重构的 N 张图像序列以 f_s 的帧率拍摄, 时间 t 被离散采样为 k/f_s , 所以希尔伯特-黄变换时频图的离散表示为

$$H(x, y; f, k/f_s) = \sum_{i=1}^n a_i(x, y, N/f_s) \cos \left(\frac{1}{f_s} \sum_{k=0}^{N-1} f_i(x, y, k/f_s) \right). \quad (12)$$

希尔伯特-黄变换具备非平稳信号的精确识别能力, 基于该变换实现的运动衬度成像可以提高时变复杂背景中自由运动目标追迹的灵敏度. 与小波变换类似, 选择衬度最高的频谱区间 $[f_{\text{LP}}, f_{\text{HP}}]$ 对时频图进行带通滤波, 获得 k/f_s 时刻希尔伯特-黄变换运动衬度成像 (Hilbert-Huang transform-move contrast imaging, HHT-MCI) 结果:

$$I_{\text{HHT}}(x, y; k/f_s) = \sum_{f=f_{\text{LP}}}^{f_{\text{HP}}} \sum_{i=1}^n a_i(x, y, N/f_s) \cos \left(\frac{1}{f_s} \sum_{k=0}^{N-1} f_i(x, y, k/f_s) \right). \quad (13)$$

3 结果与分析

3.1 自由运动目标追迹成像

为研究采用不同频谱分析方法的运动衬度成像对自由轨迹运动目标追迹成像的效果, 选取外滩上空约 700 m 远的飞鸟作为研究对象, 采用一台配备光学变焦镜头 (SEL1670Z, SONY) 的微单相机 (ILCE-6000, SONY) 搭配三脚架 (Manfrotto, 475B) 采集时序图像 (图 1). 拍摄地点为上海市浦东新区滨江码头, 拍摄时间为日落前十几分钟, 能见度变差但尚能辨别远处目标, 拍摄所用相机的探测器像素尺寸 3.92 μm 、焦距 16 mm、帧率 25 frames/s, 在 20 s 时间内采集到 500 帧尺寸 1500(H) \times 464(V) 的时序图像. 由于成像距离较远, 飞鸟在图像中仅占 3—5 个像素, 并且对比度较低.

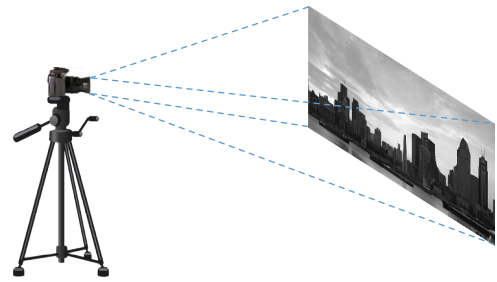


图 1 时序图像数据采集示意图

Fig. 1. Schematic diagram of time sequence image data acquisition.

建筑物和相机保持相对静止, 天空中的云和黄浦江水可以认为是低速的单向运动, 而鸟可以认为是方向和速率均无规则变化的小目标, 同时黄浦江中的船可作为匀速直线运动的对照目标. 图 2 给出了拍摄的时序图像及其频谱分析, 其中图 2(a) 为原

始图像, 选择鸟为感兴趣目标. 图 2(b) 为图 2(a) 中鸟飞过蓝色虚线标注位置前后的灰度分布曲线, 可以看到鸟飞过会造成对应位置图像灰度的短暂下降, 随后灰度值迅速恢复正常. 基于频谱分析筛选出感兴趣目标的信号是重构其运动轨迹的关键, 首先选取图 2(a) 黄色圆点标记的 4 个特征点的灰度时序信号进行傅里叶变换, 其频谱如图 2(c) 所示. 由图 2(c) 可以看出, 天空、黄浦江和建筑物对应的能量主要分布在 [0 Hz, 4 Hz] 的低频区, 而飞鸟的能量在不同频率都有分布, 且均高于其他背景位置. 不同特征点的灰度时序信号均为非平稳信号, 傅里叶变换无法定位不同频率组分出现的时间. 但从图 2(c) 可以看出, 在 [4 Hz, 9 Hz] 的频谱范围内, 飞鸟的频谱能量与周围目标的差异最大, 可利用该能量积分特征实现感兴趣目标的高对比度成像. 基于“Morse”对称小波基 (时间带宽积 60) 的连续小波变换时频分布如图 2(d)—(g) 所示, 飞鸟的能量主要集中在 [4 Hz, 11 Hz], 明显高于背

景, 这与傅里叶频谱分析的结果相符. 该场景中背景能量相对较弱, 且在时域频谱空间无规则分布. 这些信号在运动衬度图像重构时, 作为背景噪声影响追迹图像的对比度. 接下来采用希尔伯特-黄变换对信号进行自适应时频分析, 考察其频谱分辨能力及其成像对比度提升能力. 图 2(h)—(k) 给出了希尔伯特-黄变换时频图, 可以看出, 飞鸟的频谱能量在 3.5 和 6.125 Hz 这两个频率处有明显的峰, 其峰值能量远高于小波变换, 而周围位置的频谱能量则接近于 0. 飞鸟的频谱能量远高于建筑物、黄浦江及天空, 这意味着 HHT-MCI 抑制复杂背景干扰的能力更强, 能实现更高灵敏度的感兴趣目标追迹成像.

图像数据采集中所用相机的拍摄帧频为 25 frames/s, 根据抽样定理, 能实现 [0 Hz, 12.5 Hz] 时域频谱范围内的运动衬度成像. 由于每只鸟的飞行速率和方向各不相同, 为了覆盖更多成像目标, 根据图 2 的结果选择 FT-MCI, CWT-MCI 和 HHT-

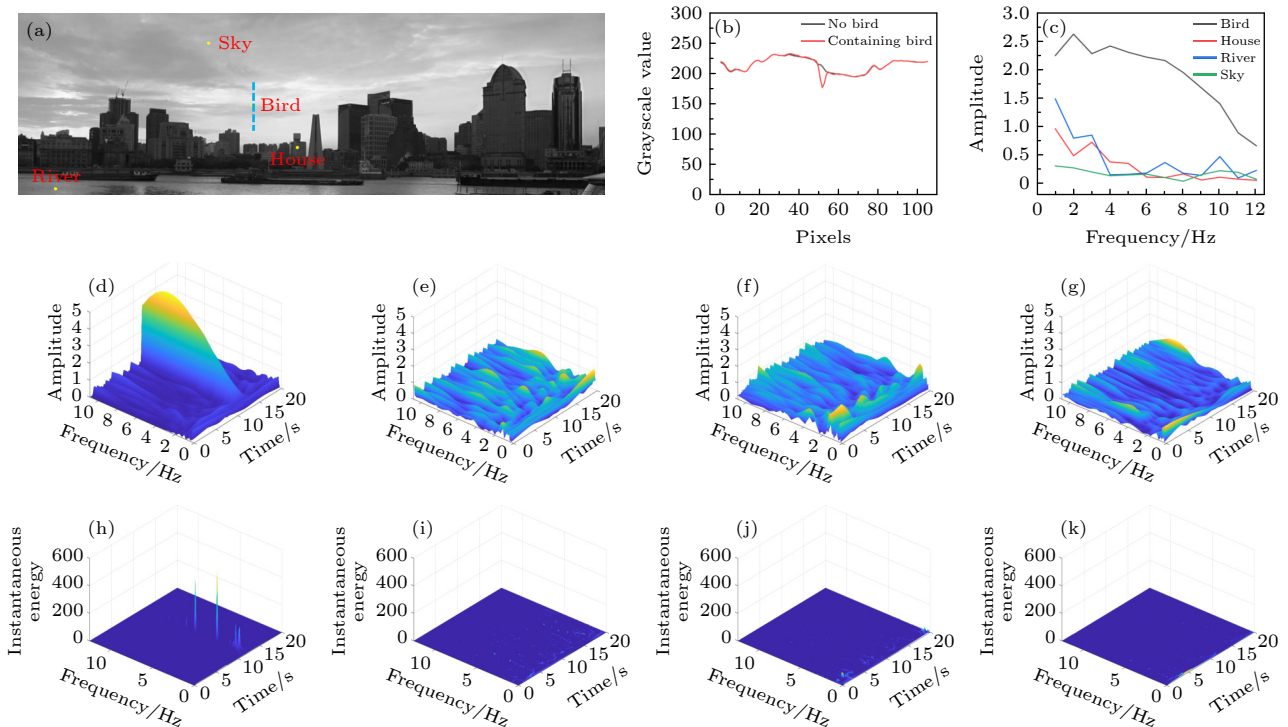


图 2 低能见度目标的时频分析结果 (a) 原始图像及 4 个特征点; (b) 图 (a) 中蓝色虚线位置的灰度轮廓曲线, 黑色曲线代表背景, 红色曲线代表鸟飞过时的灰度分布; (c) 图 (a) 中标示的 4 个特征点傅里叶变换频谱; (d) 飞鸟、(e) 建筑物、(f) 黄浦江以及 (g) 天空的连续小波变换时频图; (h) 飞鸟、(i) 建筑物、(j) 黄浦江以及 (k) 天空的希尔伯特-黄变换时频图

Fig. 2. Low visibility target image and time-frequency analysis: (a) Raw image and 4 feature points; (b) grayscale line profile at the position of blue dashed line in panel (a), where the black and red curve represent before and after the bird's flight, respectively; (c) Fourier transform spectrum of 4 feature points marked in panel (a); continuous Wavelet transform time-frequency graphs of (d) flying bird, (e) house, (f) Huangpu River and (g) sky marked in panel (a); Hilbert-Huang transform time-frequency graphs of (h) flying bird, (i) buildings, (j) Huangpu River and (k) sky marked in panel (a).

MCI 的最佳重构区间分别为 [4 Hz, 9 Hz], [4.1 Hz, 10.9 Hz] 和 [3 Hz, 6.5 Hz]. 根据 FT-MCI 的原理, 假设短时间内目标运动到临近位置时灰度值近似不变, 目标运动将导致傅里叶频谱发生相移^[21], FT-MCI 的相位信息反映出目标的时间信息. 图 3(a)—(d) 给出了原始图像与时间减影成像 (time subtraction imaging, TSI) 及不同 MCI 重构的图像融合, 其中灰度部分代表原始图像, 彩色部分代表目标的追迹结果, 从红到蓝的颜色变化对应着 11.52—12.52 s 内目标位置随时间的演化, 如图 3(a) 左上角给出的时间-颜色映射表所示. 在此基础上, 可结合已知信息估算感兴趣目标运动速度或目标到观察点的距离 (详见附录 B). 从图 3(b) 可以看出 FT-MCI 除了能得到鸟和船的轨迹外, 静止不动的建筑物也有信号. 这是由于原始数据拍摄于接近日落时段, 越来越弱的光照导致图像背景区域的灰度逐渐降低, 引起对应位置的中高频组分增加, 而 FT-MCI 不适合用于非平稳信号, 难以区分光照变化引起的频率漂移. CWT-MCI 和 HHT-MCI 具备识别非平稳信号的能力, 可有效检测并区分非目标组分导致的伪影.

接下来以 TSI 重构结果为基准, 评估不同运动衬度成像方案的效果. 不同成像方案的图像灰度

区间不尽一致, 为了统一对比, 选择特定背景区域的灰度均值作为判定标准 (详见附录图 B2(a) 的白色虚线框), 对不同图像的灰度值进行归一化. 如图 3(e) 所示, 白色虚线标记位置归一化灰度分布轮廓曲线表明, 运动衬度成像的信号强度均高于 TSI, FT-MCI 和 CWT-MCI 的信号强度比较接近, HHT-MCI 的信号强度明显高于其他方法.

采用相对对比度 (relative contrast, RC)^[29], 进一步定量分析不同方案的成像效果:

$$C_R = \frac{|G_{\text{tgt}} - G_{\text{bkg}}|}{G_{\text{tgt}} + G_{\text{bkg}}}, \quad (14)$$

其中 G_{tgt} 和 G_{bkg} 分别为目标和背景的灰度均值, 目标和背景区域的选取详见附录图 B2(a) 的黄色和红色虚线框. 表 1 列出了不同成像结果的定量分析, TSI 的相对对比度为 0.0046, 以此为基准, FT-MCI 和 CWT-MCI 的相对对比度分别提高 179.9 倍和 175.8 倍, 而 HHT-MCI 提高了 214.6 倍. 对低可见度飞鸟的成像结果表明, MCI 相比 TSI 可将成像灵敏度提升两个数量级以上, 其中 HHT-MCI 相较 FT-MCI 与 HHT-MCI 优势明显. 这意味着, 基于 HHT-MCI 有望实现时变复杂背景、自由运动目标的高灵敏追迹成像.

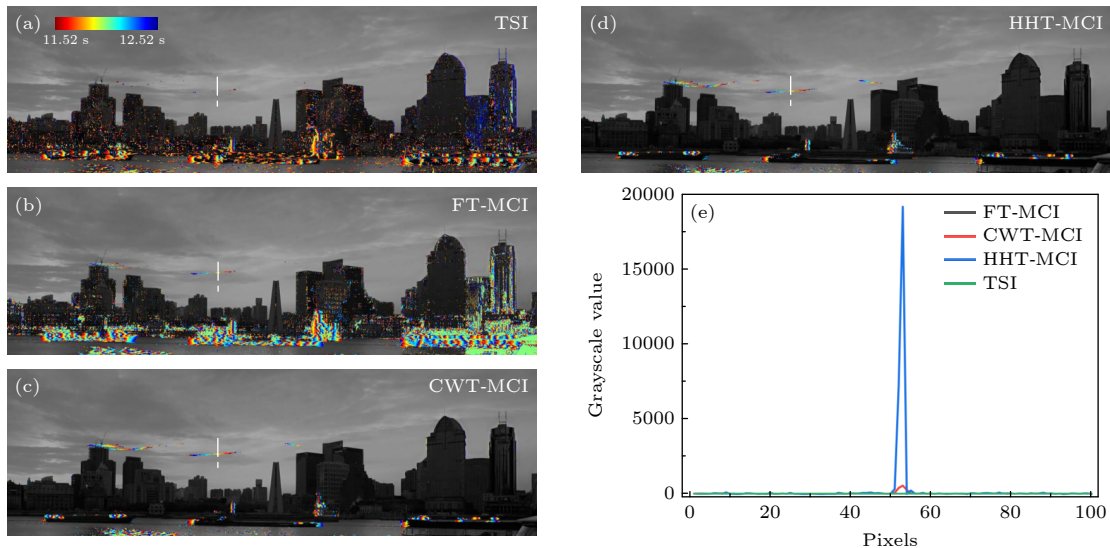


图 3 基于不同频谱分析方法的运动衬度成像结果对比 (a) TSI, (b) FT-MCI, (c) CWT-MCI 和 (d) HHT-MCI 成像结果与原始图像融合, 从红到蓝的颜色变化代表目标位置随时间的演化; (e) 图 (a)—(d) 白色虚线标记处目标轨迹的归一化灰度分布轮廓曲线

Fig. 3. Comparison of move contrast imaging results based on different spectral analysis methods. The imaging results of (a) TSI, (b) FT-MCI, (c) CWT-MCI and (d) HHT-MCI merged with raw image, and the color evolution from red to blue indicates the change of target position over time. (e) Normalized grayscale line profile of target trajectory marked by white dashed line in panel (a)–(d).

表 1 不同方法对低可见度目标追迹成像效果比较
Table 1. Comparison of relative contrast in tracking imaging of low-visibility targets.

Evaluating indicator	TSI	FT-MCI	CWT-MCI	HHT-MCI
C_R	0.0046	0.8275	0.8088	0.9873
Improvement	—	179.9	175.8	214.6

3.2 时变复杂背景自由运动目标追迹成像

长满叶子的树林受风吹动导致树叶的朝向持续无规则变化, 自然光照条件下的树林和远处的天空均属时变复杂背景. 选取约 300 m 远处常绿树林及更远处天空中的飞鸟作为追迹目标, 研究 HHT-MCI 对时变复杂背景下自由运动目标追迹成像的效果. 使用与前述相同的成像设备和拍摄方式, 在中国科学院上海应用物理研究所园区内拍摄所外远处樟树林中的飞鸟. 拍摄时间为早晨 05:53, 相机参数为焦距 50 mm, 帧率 25 frames/s, 在 12 s 内采集到 300 帧尺寸为 1200(H)×360(V) 的图像. 拍摄时间是在当天日出后约 14 min, 此时光照较弱, 并有较大晨雾, 进一步降低了图像的能见度, 难以直接从图像中辨别飞鸟轨迹.

图 4 给出了 FT-MCI 追迹成像的结果, 其中图 4(a) 和图 4(b) 分别为原始图像及时间减影图像, 图 4(c) 给出了标准差随帧数的变化曲线. 由图 4

可以看出, 原始图像的标准差几乎不随帧数发生波动, 时间减影图像的标准差随帧数略有起伏, 但变化幅度很小, 其标准差-帧数曲线仍近似为一条水平直线. 这意味着, 在这种情形下, 目标导致的图像灰度变化非常微弱, 仅从原始图像和时间减影图像已很难分辨飞鸟轨迹. 相对背景中的其他对象来说, 鸟的运动速度最快, 飞鸟信号应处在高频区间. 为确定飞鸟的大致位置以方便进一步的时频分析, 首先采用 FT-MCI 对高频组分进行重构, 结果如图 4(d) 所示. 图 4(d) 中黄色箭头标示位置可识别出复杂树林背景中明显的飞鸟轨迹, 很明显, 背景噪声对飞鸟轨迹衬度的干扰严重. 为消除时变复杂背景的影响, 需要进一步提高运动衬度成像的频谱分辨能力.

图 5 给出了飞鸟、建筑物、树林和天空等特征点的时域频谱分析结果. 从图 5(b) 所示的傅里叶变换频谱可以看出, 图 5(a) 黄色圆点标记的建筑物、天空和树林这 3 个背景区域特征点的频谱能量在各个频段均有分布, 鸟的频谱能量在 [3 Hz, 5 Hz] 和 [9 Hz, 11 Hz] 频段与环境信号有明显的区分度. 从图 5(c)–(f) 的连续小波变换时频图可以看出, 鸟的频谱能量集中在高频区域一个较短的时间内, 背景区域的频谱能量则分散于整个时频空间. 相对

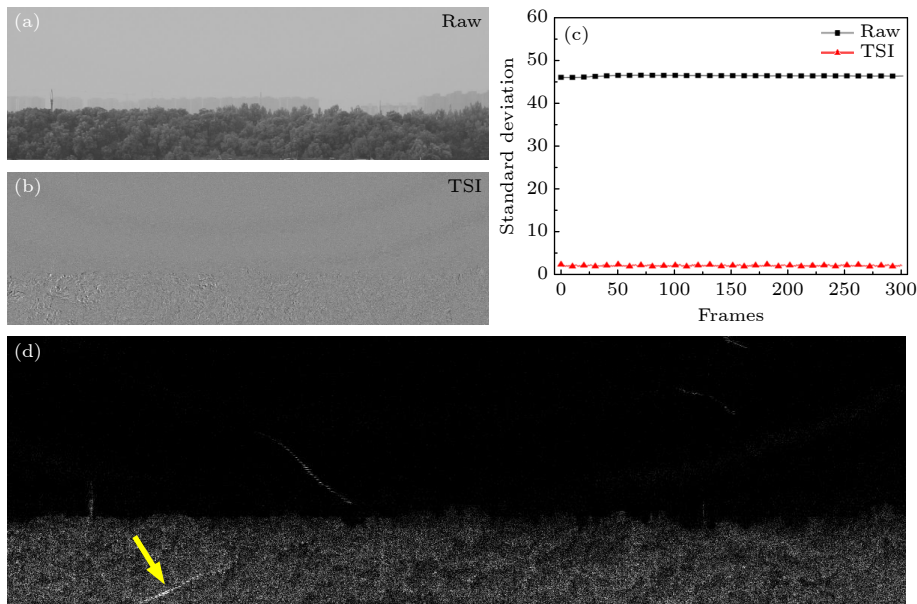


图 4 FT-MCI 对时变复杂背景自由运动目标的追迹成像结果 (a) 原始图像; (b) 时间减影图像; (c) 原始图像和时间减影图像标准差随帧数的变化; (d) 基于傅里叶变换的运动衬度图像, 黄色箭头标示飞鸟轨迹位置

Fig. 4. FT-MCI imaging results of target trajectory in time-varying complex background: (a) Raw image; (b) time subtraction image; (c) the evolution of standard deviation of raw image and time subtraction image with the number of frames; (d) move contrast image based on Fourier transform, and yellow arrow marked the location of bird trajectory.

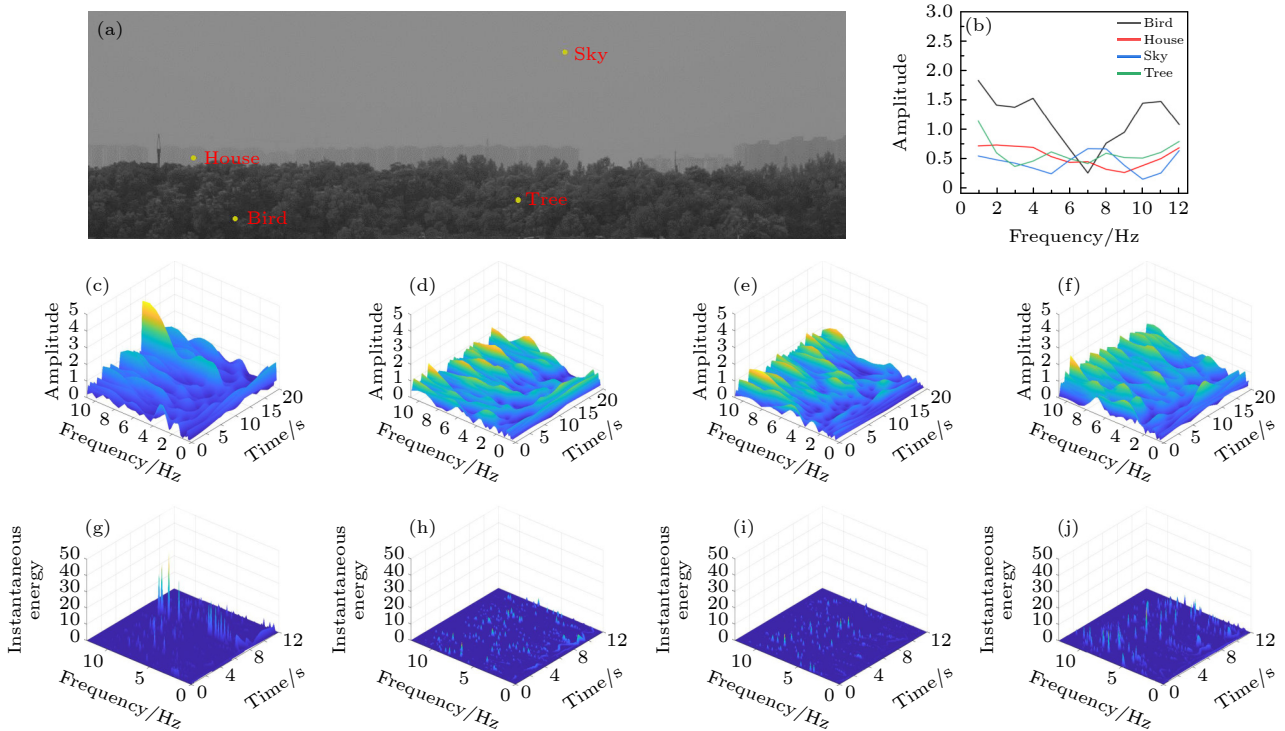


图 5 目标特征点的时频分析结果 (a) 原始图像及 4 个特征点; (b) 图 (a) 中标记的 4 个特征点的傅里叶变换频谱; (c) 飞鸟、(d) 建筑物、(e) 天空以及 (f) 树林的连续小波变换时频图; (g) 飞鸟、(h) 建筑物、(i) 天空及 (j) 树林的希尔伯特-黄变换时频图
 Fig. 5. Time-frequency analysis of target feature points: (a) Raw image and 4 feature points; (b) Fourier transform spectrum of 4 feature points marked in panel (a); (c)–(f) continuous wavelet transform time-frequency graphs of (c) flying bird, (d) house, (e) sky and (f) tree marked in panel (a); (g)–(j) Hilbert-Huang transform time-frequency graphs of (g) flying bird, (h) house, (i) sky, and (j) tree marked in panel (a).

于背景区域, 小波变换的目标频谱能量区分度不大, 且背景频谱分布复杂. 图 5(g)–(j) 给出了希尔伯特-黄变换的时频图, 如图 5(g) 所示, 鸟的频谱能量主要集中在 8, 9.3, 10.1 和 10.5 Hz 这 4 个分立的频率上, 而背景信号的能量则零落分布于不同频段且远低于鸟的能量. 很显然, HHT-MCI 对这类复杂环境中的目标追迹具有更高的分辨能力, 可以获得质量更高的飞鸟目标追迹像.

由图 5 的时频分析结果可知, 采用 HHT-MCI 方法对飞鸟进行追迹成像, 选择 [7.4 Hz, 11.1 Hz] 作为重构频段有望获得最优的成像质量. 图 6(a) 给出了 HHT-MCI 飞鸟目标追迹成像结果, 可以看出 HHT-MCI 已基本消除复杂背景噪声的影响, 实现飞鸟的高信噪比追迹成像. 将图 6(a) 与 FT-MCI 的相位图和原始图像融合即可得到图 6(b) 所示飞鸟位置随时间的演化, 其中灰度部分为原始图像, 从红到蓝的颜色变化方向代表鸟的飞行方向. FT-MCI 相位图是基于短时间内目标灰度近似不变这个假设得到的 [21], 由于鸟在图像中衬度较低, 导致运动衬度对时间的估算会有一定误差. 尽管如此,

图 6(b) 依然能反映出目标的运动方向. 另外, 与固定的拍摄帧频相比, 鸟的飞行速度更高且随时间无规则变化, 因而在时序图像中鸟的位置为线状的离散点. 这意味着, 如需完整追迹飞鸟的轨迹, 需要使用更高帧频的相机采集时序图像.

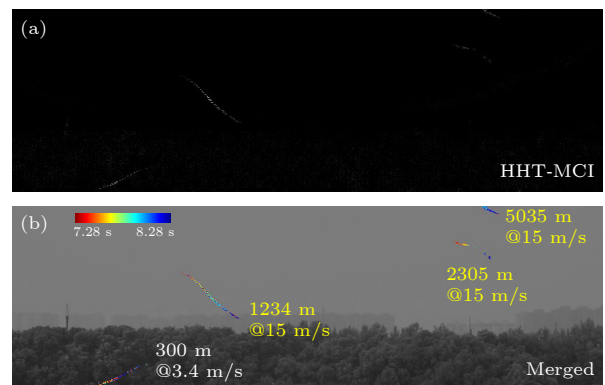


图 6 HHT-MCI 对时变复杂背景中自由运动目标的追迹成像结果 (a) 飞鸟轨迹运动衬度像; (b) 运动衬度图像与原始图像的融合
 Fig. 6. Target tracking results under complex background: (a) Bird trajectories obtained by HHT-MCI; (b) fusion of HHT-MCI, FT-MCI and raw image.

结合拍摄参数 $d = 3.92 \mu\text{m}$, $f = 50 \text{ mm}$, 运动衬度重构的时间长度 $\Delta t = 1 \text{ s}$, 可以进一步估算目标的平均速度或目标与观察点的距离 (其中 d 为相机探测器像素尺寸). 以树林为参照物可知图像最下方的飞鸟距离拍摄点约 300 m , 据附录 (B2) 式估算出其飞行速度约为 3.4 m/s , 在图 6(b) 中用白色字体标记. 图像上方鸟的背景为天空, 缺乏有效参照物, 无法直接得知其距离. 根据研究人员的雷达测速结果, 鸟类的飞行速度一般为 $10\text{--}20 \text{ m/s}$ ^[30], 考虑到鸟的种类以及风速的影响, 假设它们的速度约为 15 m/s , 据附录 (B2) 式估算出它们的距离分别约为 1234 m , 2305 m 和 5035 m , 在图 6(b) 中用黄色字体标记. 综上可知, HHT-MCI 可实现时变复杂背景下自由轨迹运动目标的成像.

很多应用场景对追迹成像的实时性要求较高, 图像的重构速度是衡量方法适用性的重要指标. 对信号进行时频变换需要进行频繁的相关运算, 运动衬度重构需要逐点进行时频变换, 因此计算量随图像尺寸和重构序列长度的增大而增长. 以树林中的飞鸟追迹为例, 原始数据为 25 帧像素尺寸为 $1200(\text{H}) \times 360(\text{V})$ 的图像序列, 重构所计算机 CPU 为 Intel Core i9-9900K. 基于 CPU 的 FT-MCI 重构耗时 0.614 s , CWT-MCI 重构耗时 62.102 s , HHT-MCI 重构耗时 218.068 s . 很显然, 这些重构速度距离实时成像的需求还有一定差距, 其中图像质量最高的 HHT-MCI 所需的重构时间最长. 由于运动衬度重构中各像素点时频变换是独立进行的, 采用 GPU 并行运算可大幅提升图像重构效率^[31], 从而满足快速成像乃至实时成像的需求. 当然, 减小视场和像素数也可有效提升图像重构效率.

4 结论

针对复杂背景自由运动目标追迹成像的需求, 本文发展了对非平稳信号具有高区分能力的 HHT-MCI 方法. 低可见度自由运动目标的追迹结果表明, 与时间减影成像相比, FT-MCI, CWT-MCI 和 HHT-MCI 可将目标追迹成像灵敏度分别提升 179.9 倍、 175.8 倍和 214.6 倍. 复杂背景中自由运动目标的追迹成像结果表明, 相比 FT-MCI 和 CWT-MCI, HHT-MCI 可进一步有效抑制背景噪声对感兴趣目标追迹成像的影响, 实现时变复杂背景下自由运动目标的高灵敏度成像. 结合 FT-MCI 的相位图

及成像参数等相关信息, 还可以进一步给出目标的运动方向、运动速率或与观测点的距离信息. 因此, 本文发展的 HHT-MCI 成像方法可望为时变复杂背景自由运动目标追迹成像提供一种新的手段.

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所韩中生研究员的有益讨论和建议.

附录 A 希尔伯特-黄变换经验模态分解

经验模态分解 (EMD) 是一个迭代过程, 每个固有模态函数需要满足两个条件: 1) 在整个数据中, 极值的数量和零点的数量必须相等或最多相差 1; 2) 在数据的任何一点上, 上下包络线的平均值为零^[25]. EMD 的迭代过程为^[26]

1) 使用三次样条插值将时域信号 $g(x, y, t)$ 局部极大值连接起来作为信号的上包络, 将局部极小值连接起来作为信号的下包络;

2) 求出上下包络的均值记作 $m_1(x, y, t)$, 计算 $h_1(x, y, t) = x(x, y, t) - m_1(x, y, t)$;

3) 若 $h_1(x, y, t)$ 满足 IMF 的条件, 则 $h_1(x, y, t)$ 就是第一个 IMF. 否则将 $h_1(x, y, t)$ 作为 $g(x, y, t)$ 重复进行 k 次步骤 1) 和 2), 直至 k 次迭代后得到满足条件的 IMF, 记作 $c_1(x, y, t) = h_{1k}(x, y, t)$;

4) 在得到 $c_1(x, y, t)$ 后, 计算 $r_1(x, y, t) = g(x, y, t) - c_1(x, y, t)$, 然后将 $r_1(x, y, t)$ 输入步骤 1)–3) 求出 $r_2(x, y, t)$. 重复执行 n 次, 直到 $r_n(x, y, t)$ 是单调函数, 无法再进行 EMD, $r_n(x, y, t)$ 是反映数据趋势的残余项.

附录 B 速度或距离估算

运动衬度成像能给出目标的高灵敏运动轨迹, 结合已知成像参数可对目标的速度或距离进行估算. 原始图像数据通过配备光学变焦镜头的相机进行采集, 尽管相机的成像元件多且复杂, 但可以简化为图 B1 所示的成像模型. 根据比例关系可得

$$s = ndL/f, \quad (\text{B1})$$

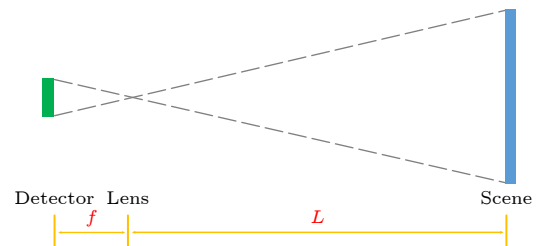


图 B1 成像模型

Fig. B1. Imaging model.

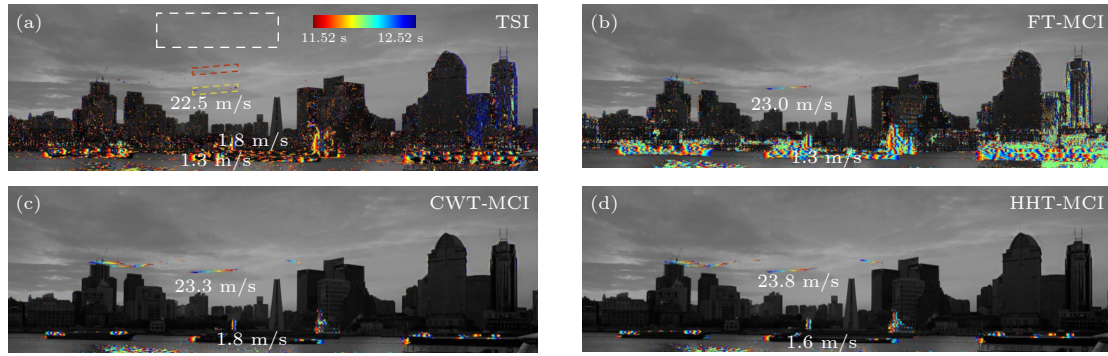


图 B2 (a) 时间减影和 (b)–(d) 运动衬度成像对平均速度的估算结果

Fig. B2. Average speed estimation based on (a) time subtraction imaging and (b)–(d) move contrast imaging.

其中 s 代表成像视场中的实际距离, n 代表图像中目标轨迹的长度 (单位: 像素), d 代表相机探测器像素尺寸, L 代表成像距离, f 代表镜头焦距. 那么 Δt 时间内的平均速度为

$$\bar{v} = ndL/(f\Delta t). \quad (\text{B2})$$

黄浦江边的拍摄参数为鸟和船距离相机分别约为 700 m 和 300 m, $d = 3.92 \mu\text{m}$, $f = 16 \text{ mm}$, 运动衬度重构的时间长度 $\Delta t = 1 \text{ s}$. 通过附录 (B2) 式计算出鸟和船相对大地的速度估计如附录图 B2 所示, 图中从红到蓝的颜色变化代表目标的运动方向, 数值代表速率大小. 图 B2 标出速度的船实际长度约 40 m, 在图像中占 365 个像素, 根据时间减影成像结果可知船在 1 s 内向右前进了 16 个像素, 推算出船的平均速度约为 1.8 m/s, 这与图 B2 各种成像方案对船的速度估计相近, 表明运动衬度成像可以估算目标的平均速度. 由附录 (B2) 式可知, 在已知目标速度的情况下也可估算出目标与观察点之间的距离.

参考文献

- [1] Cheng Y H, Wang J 2014 *AMM* **490** 1283
- [2] Xu Y, Wang P G, Yang Q, Dong J T 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 164203 (in Chinese) [徐艳, 王培光, 杨青, 董江涛 2019 物理学报 **68** 164203]
- [3] Shen Y, X. W X 2017 *Autom. Instrum.* **4** 122 (in Chinese) [沈瑜, 王新新 2017 自动化与仪器仪表 **4** 122]
- [4] Husein A M, Calvin, Halim D, Leo R, William 2019 *J. Phys. Conf. Ser.* **1230** 012017
- [5] Markandey V, Reid A, Wang S 1996 *IEEE Trans. Electron. Syst.* **32** 866
- [6] Cui Z G, Wang H, Li A H, Wang T, Li H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 084203 (in Chinese) [崔智高, 王华, 李艾华, 王涛, 李辉 2017 物理学报 **66** 084203]
- [7] Yuan G W, Chen Z Q, Gong J, Xu D, Liao R J, He J Y 2013 *J. Chin. Comput. Syst.* **34** 668 (in Chinese) [袁国武, 陈志强, 龚健, 徐丹, 廖仁健, 何俊远 2013 小型微型计算机系统 **34** 668]
- [8] Han X W, Gao Y, Zheng L, Zhang Z M, Niu D 2015 *Fifth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication, and Control (IMCCC) Qinhuangdao, China, September 18–20, 2015* p579
- [9] Lian K, Yan M, Li D, Wang H J 2011 *Telecommun. Eng.* **51** 49 (in Chinese) [连可, 严明, 李丹, 王厚军 2011 电讯技术 **51** 49]
- [10] Dong X B, Huang X S, Zheng Y B, Bai S J, Xu W Y 2014 *Infrared Phys. Technol.* **65** 36
- [11] Zhang H, Zhao B J, Mao E K, Zhu M Y 2001 *Infrared Laser Eng.* **30** 96 (in Chinese) [张弘, 赵保军, 毛二可, 朱梦宇 2001 红外与激光工程 **30** 96]
- [12] Lü P Y, Sun S L, Lin C Q, Liu G R 2018 *Infrared Phys. Technol.* **91** 107
- [13] Wu Y, Yang Z, Niu W L, Zheng W 2018 *IGARSS Valencia, Spain, July 22–27, 2018*, p7066
- [14] Zheng X F 2015 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Hangzhou Dianzi University) (in Chinese) [郑晓枫 2015 硕士学位论文 (杭州: 杭州电子科技大学)]
- [15] Lyu T J, Yuan Z Q, Lei G, Ren Z Y 2021 *Fire Control Radar Technol.* **50** 78 (in Chinese) [吕腾蛟, 袁子乔, 雷刚, 任泽宇 2021 火控雷达技术 **50** 78]
- [16] Liu B, J L, Li X R 2016 *IEEE Trans. Signal Process.* **64** 3221
- [17] Wang H M, Hong M 2018 *Fire Control & Command Control* **43** 78 (in Chinese) [王海梅, 洪敏 2018 火力与指挥控制 **43** 78]
- [18] Ward M 2011 *IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA, March 05–12, 2011* p1
- [19] Hou W, Yu Q F, Lei Z H, Liu X C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074208 (in Chinese) [侯旺, 于起峰, 雷志辉, 刘晓春 2014 物理学报 **63** 074208]
- [20] Wang F X, Zhou P T, Li K, et al. 2020 *IUCrJ* **7** 793
- [21] Li K 2021 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李可 2021 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [22] Ju X L, Li K, Yu F C, Xu M W, Deng B, Li B, Xiao T Q 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 144101 (in Chinese) [鞠晓璐, 李可, 余福成, 许明伟, 邓彪, 李宾, 肖体乔 2022 物理学报 **71** 144101]
- [23] Aguiar-Conraria L, Soares M J 2011 *The Continuous Wavelet Transform: A Primer* (NIPE-Universidade do Minho) No. 16/2011
- [24] Sadowsky J 1994 *Johns Hopkins APL. Tech. Digest* **15** 306
- [25] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998 *Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* **454** 903
- [26] Guan J, Zhang J, Liu N B, Li B 2009 *IEEE Rad Conf Pasadena, CA, USA, May 04–08, 2009* p1
- [27] Huang N E, Wu Z H 2008 *Rev. Geophys.* **46** RG2006
- [28] Huang N E, Shen S S P 2014 *Hilbert Huang Transform and its Applications* (2nd Ed.) (Singapore: World Scientific) p13
- [29] Sun Y Y 2007 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Industrial University) (in Chinese) [孙玉宇 2007 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [30] Bruderer B, Boldt A 2001 *Ibis* **143** 178
- [31] Zhang Y, Xie H L, Du G H, Xu M W, Xue Y L, Xiao T Q 2021 *Nucl. Tech.* **44** 060101 (in Chinese) [张园, 谢红兰, 杜国浩, 许明伟, 薛艳玲, 肖体乔 2021 核技术 **44** 060101]

High sensitivity tracking of free-moving targets in time-varying complex backgrounds*

Xu Ming-Wei¹⁾²⁾³⁾ Du Kang¹⁾²⁾³⁾ Li Ke²⁾

Wang Fei-Xiang²⁾ Xiao Ti-Qiao^{1)2)3)†}

1) (*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Research Center for Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 March 2023; revised manuscript received 6 May 2023)

Abstract

Tracking of low-visibility targets in complex backgrounds is an important research field, where existing methods struggle to image low-visibility targets with irregular changes in moving direction and speed. Move contrast imaging can greatly improve the sensitivity of target tracking, which has achieved important applications in the field of X-ray imaging, including high-resolution imaging to microvessels in living rats with the help of contrast agents, *in-situ* dynamic observation of ion migration and redox reactions during electrochemical reactions, and water refilling along vessels in willow branch without resorting to agents. However, all these applications are limited to imaging with fixed trajectories or monotonous backgrounds. In principle, move contrast imaging is based on the frequency spectral characteristics of the time-domain grayscale signal and is highly sensitive to moving components, which is wavelength-independent. This paper extends the move contrast imaging to the visible light waveband for tracking free-moving targets in time-varying complex backgrounds. To meet the need for tracking imaging of free-moving targets in complex backgrounds, we develop a move contrast imaging (MCI) method based on continuous wavelet transform (CWT) and Hilbert-Huang transform (HHT) with high discriminatory capability for non-stationary signals. Selecting birds in the sky and forest for the tracking imaging, the irregular grayscale changes caused by natural light intensity in the wild field and random swaying of tree leaves result in complex imaging backgrounds. The tracing results of low-visibility free-moving targets show that FT-MCI method, CWT-MCI method and HHT-MCI method can improve the target tracing imaging sensitivity by 179.9 times, 175.8 times and 214.6 times compared with temporal subtraction imaging, respectively. The results of tracking imaging of free-moving targets in complex backgrounds show that compared with the FT-MCI method and CWT-MCI method, the HHT-MCI method can further effectively suppress the influence of background noise on tracking imaging of targets of interest, thus achieving high sensitivity imaging of free-moving targets in time-varying complex backgrounds. Combining the phase diagram of FT-MCI and the imaging parameters, we can further show the motion direction, the motion speed or the distance from the observation point. Therefore, the HHT-MCI imaging method developed in this paper is expected to provide a novel method for tracking free-moving targets in time-varying complex backgrounds.

Keywords: high sensitivity tracking imaging, move contrast imaging, time-varying complex background, low visibility target tracking

PACS: 07.05.Pj, 43.60.Gk, 42.30.Va, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.72.20230360

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2022YFA1603601, 2021YFF0601203, 2021YFA1600703) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12205361).

† Corresponding author. E-mail: txiao@sari.ac.cn



时变复杂背景自由运动目标的高灵敏追迹成像

许明伟 杜康 李可 王飞翔 肖体乔

High sensitivity tracking of free-moving targets in time-varying complex backgrounds

Xu Ming-Wei Du Kang Li Ke Wang Fei-Xiang Xiao Ti-Qiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 150701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230360

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230360>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

透过散射介质对直线运动目标的全光成像及追踪技术

All-optical imaging and tracking technology for rectilinear motion targets through scattering media

物理学报. 2018, 67(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180955>

电解池电化学反应过程的运动衬度X射线成像

Move contrast X-ray imaging of electrochemical reaction process in electrolytic cell

物理学报. 2022, 71(14): 144101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220339>

高对比度目标的电磁逆散射超分辨成像

Super-resolution imaging of high-contrast target in electromagnetic inverse scattering

物理学报. 2018, 67(14): 144101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180266>

基于元胞自动机的气动光学光线追迹算法

Cellular automata ray tracing in two-dimensional aero-optical flow fields

物理学报. 2020, 69(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200532>

免分析光栅一次曝光相位衬度成像方法

Method of single exposure phase contrast imaging without analyser grating

物理学报. 2021, 70(2): 028701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201170>

基于时变状态网络的银行风险传导研究

Risk transmission between banks based on time-varying state network

物理学报. 2020, 69(13): 138901 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200221>