

文章编号: 1672-8785(2014)06-0030-06

# 一种基于蝙蝠算法的新型小波红外光谱去噪方法

陈媛媛<sup>1,3</sup> 王志斌<sup>1,2,3</sup> 王召巴<sup>1,2</sup>

(1. 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051 ;

2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051 ;

3. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘 要:** 针对传统的小波去噪方法容易产生信号振荡和丢失特征信息等问题, 提出了一种基于蝙蝠算法的新的有效的红外光谱去噪方法。该方法创新性地运用蝙蝠算法优化了小波阈值和估计因子。其基本思想是, 首先在解空间中随机生成一定规模的个体, 然后根据向当前最优个体学习的方法进行速度更新, 从而实现位置更新; 同时, 由于 Lévy 飞行搜索策略会产生较大跳跃, 利用这种不均匀、随机游走的特性可以实现对整个解空间的搜索, 从而避免陷入局部极值点。CO 气体红外光谱去噪实验的结果表明, 利用蝙蝠算法对各个分解层的阈值和估计因子进行优化后, 信噪比为 84.184, 均方误差为 0.0006。由于更有针对性地保留了光谱信号中的特征信息并剔除了无用的噪声信息, 该方法可以提高后续定性和定量分析的精度。

**关键词:** 红外光谱; 蝙蝠算法; Lévy 飞行搜索策略; 小波阈值去噪

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.06.006

## A Novel Wavelet Denoising Method for IR Spectrum Based on Bat Algorithm

CHEN Yuan-yuan<sup>1,3</sup>, WANG Zhi-bin<sup>1,2,3</sup>, WANG Zhao-ba<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Lab of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China; 3. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** To solve the problems present in traditional wavelet denoising methods, such as unexpected oscillation occurring and loss of characteristic information, a novel and effective wavelet denoising method for IR spectrum based on bat algorithm (BA) is proposed. In the method, both threshold and estimation factor are optimized by BA innovatively. Its basic idea is that firstly a certain size of individuals are generated in the solution space randomly and then the velocity and location of each bat are updated according to its distance from the best bat individual. Meanwhile, by using the random walking characteristics of Levy flight search strategy, the search for the whole solution space can be implemented and

**收稿日期:** 2014-04-24

**基金项目:** 国家自然科学基金仪器专项基金 (61127015); 国际科技合作项目 (2012DFA10680); 国际科技合作项目 (2013DFR10150); 山西省青年科技研究基金 (2013021028-1)

**作者简介:** 陈媛媛 (1980-), 女, 山西交城人, 博士, 讲师, 主要从事光谱信息处理技术和智能算法研究。

E-mail: chenyy@nuc.edu.cn

falling into the local minimum can be avoided. The experimental result of CO gas IR spectrum denoising shows that after the threshold and estimating factor in each layer of wavelet decomposition are optimized by using the proposed wavelet denoising method, the signal-to-noise ratio (SNR) is up to 84.184 and the root square error (RMSE) is 0.0006. Because the characteristic information in the spectral signal is reserved and the unwanted noise information is removed more accurately, the method can be used to improve the accuracy of subsequent qualitative and quantitative analysis.

**Key words:** infrared spectrum; bat algorithm; Lévy flight search strategy; wavelet threshold denoising

## 0 引言

在红外光谱数据分析和处理中, 滤波去噪是重要的数据预处理环节之一。其目的是为了在被测物质的红外特征光谱信号中去除噪声等外界因素的干扰, 提高分析准确度, 改善光谱分析信号的性能。小波变换是红外谱图分析中常用的滤波算法之一。该算法能够同时在时域和频域对信号进行分析, 从而有效提取信号中的突变成分及噪声, 实现非平稳信号的去噪。在利用小波变换去除噪声时, 阈值的选取至关重要, 因为它会直接影响滤波效果。常用的阈值确定方法主要包括 Sure shrink 阈值方法 (rigsure 规则)、启发式阈值方法 (heursure 规则) 以及极大极小准则 (minimaxi 规则) 等。上述方法在确定阈值的过程中带有一些猜测性, 因此其去噪效果并不稳定<sup>[1-6]</sup>。

为了解决上述问题, 本文提出了一种基于蝙蝠算法的新型小波红外光谱去噪方法。首先利用蝙蝠算法并结合 Lévy 飞行搜索策略对小波分解各层的阈值和估计因子进行优化, 然后再用优化结果对红外光谱进行去噪处理。

## 1 算法描述

### 1.1 蝙蝠算法

蝙蝠算法是由 Yang X S 于 2010 年提出的一种新型启发式算法。蝙蝠在探测猎物时, 通过调整发出的脉冲音量实现大范围搜索, 并通过调整发出的脉冲频率精确掌握猎物不断变化的空间位置<sup>[7]</sup>。蝙蝠算法首先在可行解空间中对种群进行初始化, 并随机对个体的位置和速度进行初始化, 其中位置表示问题的可能解; 在搜索

过程中, 每一只蝙蝠的速度和位置可按式 (1) 和式 (2) 进行更新:

$$\mathbf{v}_i^t = \mathbf{v}_i^{t-1} + (\mathbf{x}_i^{t-1} - \mathbf{x}^*) \cdot f_i \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_i^t = \mathbf{x}_i^{t-1} + \mathbf{v}_i^t \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{v}_i^{t-1}$  和  $\mathbf{v}_i^t$  分别为第  $i$  只蝙蝠在  $t-1$  和  $t$  时刻的速度;  $\mathbf{x}_i^{t-1}$  和  $\mathbf{x}_i^t$  分别为第  $i$  只蝙蝠在  $t-1$  和  $t$  时刻的位置;  $\mathbf{x}^*$  为当前群体中蝙蝠位置的最优解;  $f_i$  为蝙蝠  $i$  的搜寻脉冲频率, 其范围为  $f_i \in [f_{min}, f_{max}]$ 。

对于局部搜索, 若从当前最优值中选择一个解, 蝙蝠则会随机游走产生一个新的解, 即

$$\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x}_{old} + \varepsilon A^t \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon \in [-1, 1]$ ;  $A^t$  为所有蝙蝠在  $t$  时刻的平均音量。

在搜索的开始阶段, 蝙蝠发出的脉冲音量且频率低, 便于在大范围的空间内进行搜索; 发现猎物后, 脉冲音量逐渐减小, 同时脉冲发射次数增加, 使其能够精确掌握猎物的空间位置。上述规律可以用式 (4) 和式 (5) 表示:

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t \quad (4)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (5)$$

式中,  $A_i^t$  为蝙蝠  $i$  在  $t$  时刻的音量;  $\alpha$  为音量的衰减系数, 其取值范围为  $0 < \alpha < 1$ ;  $r_i^0$  为蝙蝠  $i$  的最大脉冲发射率;  $r_i^{t+1}$  为蝙蝠  $i$  在  $t+1$  时刻的脉冲发射率;  $\gamma$  为脉冲发射率的增加系数,  $\gamma > 0$ 。

### 1.2 Lévy 飞行搜索策略

通过仔细分析式 (1) 可以发现, 蝙蝠算法的基本思想就是向当前最优个体学习并进行速度更新, 从而实现位置更新。如果当前最优个体被局部极值所吸引, 并且没有有效机制来摆脱束

缚,那么群体会迅速丧失多样性并失去进化能力。因此,基本的蝙蝠算法具有易早熟的缺点。

为解决这个问题,本文引入 Lévy 飞行搜索策略。该策略用于模拟自然界中许多生物在觅食时经常采用的短距离、探索性蹦蹦跳跳与偶尔较长距离行走相间的特点。一系列研究证明<sup>[8]</sup>,由于 Lévy 飞行搜索策略会产生较大跳跃,利用这种不均匀、随机游走的特性可以有效避免局部极值的吸引。引入 Lévy 飞行搜索策略后,个体位置更新公式为<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{x}_i^t = \mathbf{x}_i^{t-1} + (\mathbf{x}_i^{t-1} - \mathbf{x}^*) \otimes \mathbf{L}(\lambda) \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{L}(\lambda)$  为跳跃步长服从 Lévy 分布时的随机搜索向量;  $\lambda$  为尺度参数,  $1 \leq \lambda \leq 3$ ;  $\otimes$  表示矢量运算。

### 1.3 基于蝙蝠算法的新型小波红外光谱去噪方法

小波滤噪中的阈值选取至关重要,因为它会直接影响信号去噪的效果和重构信号的失真程度。若阈值太小,则噪声不能得到有效去除;若阈值太大,则会造成有用信息的丢失<sup>[10-13]</sup>。本文利用基于 Lévy 飞行搜索策略的蝙蝠寻优算法寻找最优阈值和估计因子。与遗传算法类似,该算法需要将待优化的问题映射到解空间中。假设对原始信号进行  $N$  层小波分解,则对应的各层阈值和估计因子可以分别设为  $\text{thr}(i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 和  $\alpha(i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。因此,蝙蝠算法中的每个蝙蝠个体可以表示为

$$s = [\text{thr}(1), \text{thr}(2), \dots, \text{thr}(N), \alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(N)] \quad (7)$$

为了评价各个个体的优劣,本文选取信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 作为适应度函数来评价去噪效果。SNR 越高,表明去噪效果越好。

综上所述,本文提出的基于蝙蝠算法的新型小波红外光谱去噪方法主要包含以下几个步骤:

(1) 初始化,设置基本参数。依据式 (7) 随机对种群 (蝙蝠数目  $m$ ) 的位置  $\mathbf{x}_i$  和速度  $\mathbf{v}_i$  进行初始化。每个蝙蝠的长度为  $2N$ , 其中前  $N$  个元素表示各层阈值,后  $N$  个元素表示各层的估计因子。针对每个蝙蝠,对红外光谱信号进行小波

分解、阈值处理和信号重构等操作,从而实现光谱信号的去噪。根据式 (8) 计算各个个体的得分并找出群体中处于最佳位置  $\mathbf{x}^*$  的个体。

(2) 更新个体位置。按照式 (1) 和式 (2) 更新蝙蝠当前的位置和速度。

(3) 进行局部搜索。生成随机数  $R_1$ , 若  $R_1 > r_i$ , 则从当前种群中选取一个最优解,并按照式 (3) 在该解附近随机产生一个局部解。

(4) 进行 Lévy 飞行搜索。按照式 (6) 在解空间中随机产生一个新的个体;生成随机数  $R_2$ , 若  $R_2 < A_i$ , 则蝙蝠的当前位置被更新,并根据式 (4) 和式 (5) 调整脉冲发射率  $r_i$  和脉冲音量  $A_i$ 。

(5) 根据式 (8) 对蝙蝠群体进行评估,并找出当前的最佳蝙蝠及其所处的空间位置。

(6) 若迭代次数达到最大迭代次数  $N$ , 则转到第 (7) 步, 否则就转到第 (2) 步, 进行下一次搜索。

(7) 输出全局最优解和最优值, 即最佳的阈值和估计因子。

## 2 实验与结果分析

### 2.1 实验方案

我们选用北京瑞利公司生产的 WQF-520 型 FTIR 红外光谱仪进行实验数据采集。该光谱仪采用角镜型迈克尔逊干涉仪系统, 自带氘化硫酸三甘肽 (DTGS) 热电型探测器, 其探测范围为  $500 \sim 5000 \text{ cm}^{-1}$ 。另外, 考虑到分辨率和信噪比是一对相互制约的物理量, 本次实验采用的分辨率一般为  $1 \text{ cm}^{-1}$ 。

环境条件如下: 温度为 296 K, 气压为 1013.25 hPa。在密闭气室中, 我们对 CO 和  $\text{N}_2$  气体进行混合均匀采样。密闭气室的长度为 10 cm, CO 浓度为  $5000 \mu\text{mol/mol}$ , 光谱分析波段为  $2040 \sim 2150 \text{ cm}^{-1}$ , 光谱间隔为  $1.929 \text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数为 32 次。测量样品的透过率谱, 然后将其平均值作为实测光谱, 并将利用 HITRAN 数据库和逐线积分方法计算出的 CO 透过率光谱作为标准光谱, 如图 1 所示。

### 2.2 实验结果

表 1 列出了蝙蝠算法与 Lévy 飞行搜索策略

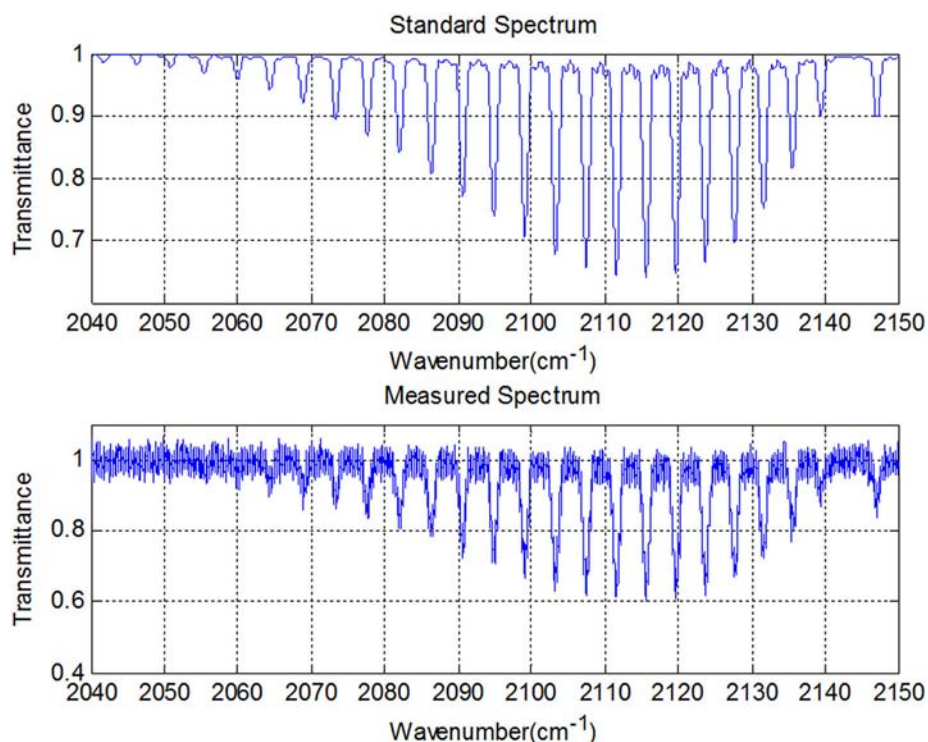


图 1 CO 气体的标准红外光谱和实测光谱

表 1 初始化参数

| 群体规模 | $f_{min}$ | $f_{max}$ | $\alpha$ | $\gamma$ | $\lambda$ | 分解层数 | 最大迭代次数 |
|------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|------|--------|
| 20   | 0         | 2         | 0.5      | 0.5      | 1.5       | 5    | 30     |

的初始化参数。小波基函数选择 sym5 类型。

为了评价蝙蝠算法的寻优性能, 本文将其与遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 及粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法进行了对比。图 2 所示为某次运行的迭代进化过程。可以看出, 蝙蝠算法的迭代次数最少 (8 次), GA 算法次之 (13 次), PSO 算法的迭代次数最多 (14 次)。同时, 蝙蝠算法的最优波长点组合所对应的适应度函数值 SNR 最高 (蝙蝠算法: 87.1; GA 算法: 66.4; PSO 算法: 85.1), 而且蝙蝠算法的迭代进化过程所经历的局部极值点次数最少 (蝙蝠算法: 2 次; GA 算法: 3 次; PSO 算法: 4 次)。因此, 综合评价收敛速度、适应度函数值以及陷入局部极值点的情况, 发现蝙蝠算法的收敛效果最好。究其原因, 是光谱数据的维度较高, GA 算法和 PSO 算法容易陷入局

部极小。由于引入了 Lévy 飞行搜索策略, 蝙蝠算法不仅能够充分保证种群的多样性, 而且还能够大大降低陷入局部极小的可能性。

表 2 列出了经过蝙蝠算法优化后得到的各个分解层的阈值及估计因子的最优值。

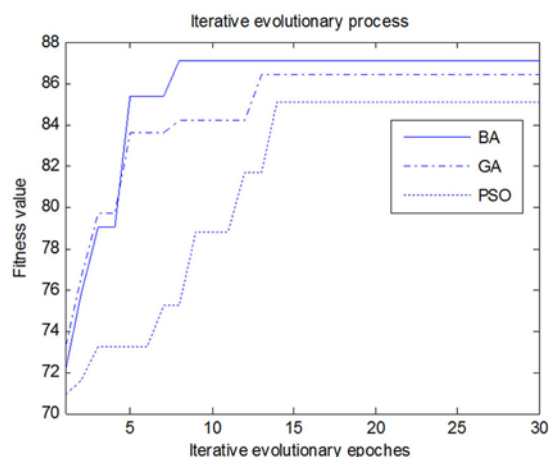


图 2 迭代进化过程

表 2 阈值及估计因子的最优值

| 分解层 | 阈值    | 估计因子  |
|-----|-------|-------|
| 1   | 0.184 | 0.870 |
| 2   | 0.165 | 0.292 |
| 3   | 0.130 | 0.410 |
| 4   | 0.112 | 0.256 |
| 5   | 0.105 | 0.008 |

为了对比用蝙蝠算法优化小波与用文献 [2] 所描述的传统小波经验阈值法 ( $\lambda = \sigma\sqrt{2\ln N}$ , 其中  $N$  为信号的长度,  $\sigma$  为噪声的方差, 一般用小波分解的第一层高频系数  $cd_1$  估计) 去噪的性能优劣, 本文分别利用 db3、sym5 和 coif3 这

三种不同的小波基函数进行小波分解、阈值化处理和重构, 其结果见表 3 和图 3。其中, 图 3 只显示了采用 sym5 小波基函数时两种方法的去噪结果, 表 3 则列出了全部三种小波基函数的情况。可以看出, 利用蝙蝠算法并结合 Lévy 飞行搜索策略对各个分解层的阈值和估计因子进行优化后, 信噪比和均方根误差均比用经验公式法确定的小波阈值的好。其中尤以 sym5 小波基函数的效果最好, SNR 达到最大值 (84.184), 均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 的最小值为 0.0006。以上实验结果表明, 通过用蝙蝠算法优化小波阈值, 可以更有针对性地保留光谱信号中的特征信息和剔除无用的噪声信息。

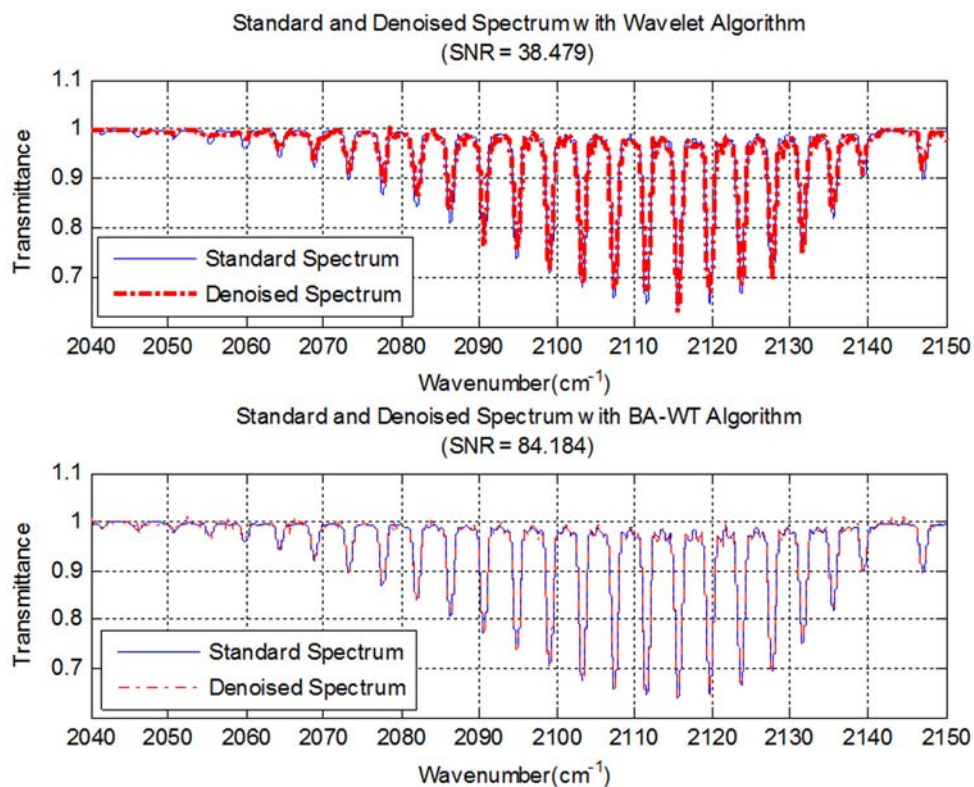


图 3 两种方法的去噪效果对比 (小波基函数类型: sym5)

表 3 不同阈值选取方法对去噪效果的影响

| 性能指标 | 蝙蝠算法优化小波去噪法 |               |        | 传统小波去噪法 |               |        |
|------|-------------|---------------|--------|---------|---------------|--------|
|      | db3         | sym5          | coif3  | db3     | sym5          | coif3  |
| SNR  | 77.904      | <b>84.184</b> | 80.759 | 49.299  | <b>38.479</b> | 49.492 |
| RMSE | 0.0014      | <b>0.0006</b> | 0.0009 | 0.037   | <b>0.035</b>  | 0.036  |

### 3 结束语

本文提出了一种基于蝙蝠算法的红外光谱去噪方法。该方法利用蝙蝠算法并结合 Lévy 飞行搜索策略对小波分解后的各层阈值和估计因子进行优化, 然后运用具有最优阈值和估计因子的小波算法对红外光谱进行滤噪。实验结果表明, 该方法在对红外光谱进行滤噪的同时, 能够最大限度地保留信号特征; 另外, 其均方误差值较小, 信噪比有所提高, 因此是一种行之有效的红外光谱滤噪方法。

### 参考文献

- [1] 陈媛媛. 基于 FTIR 大气污染气体红外光谱处理方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [2] David L D, Iain M J. Ideal Spatial Adaptation via Wavelet Shrinkage with Figures [J]. *Biometrika*, 1994, **81**: 425–455.
- [3] David L D, Iain M J. Adapting to Unknown Smoothness via Wavelet Shrinkage [J]. *J Amer Statist Assn*, 1995, **90**: 1200–1224.
- [4] Bahoura M, Rouat J. Wavelet Speech Enhancement Based on the Teager Energy Operator [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2001, **8**(1): 10–12.
- [5] 李化, 杨新春, 李剑, 等. 基于小波分解尺度系数能量最大原则的 GIS 局部放电超高频信号自适应小波去噪 [J]. *电工技术学报*, 2012, **27**(5): 84–91.
- [6] 王学伟, 王世立, 李珂. 基于伪中值滤波和小波变换的红外图像增强方法 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(1): 90–93.
- [7] Yang X S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm [J]. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*, 2010, **284**: 65–74.
- [8] Reynolds A M. Co-operative Random Levy Flight Searches and the Flight Patterns of Honeybees [J]. *Physics Letters A*, 2006, **354**(5): 384–388.
- [9] 刘长平, 叶春明. 具有 Lévy 飞行特征的蝙蝠算法 [J]. *智能系统学报*, 2013, **8**(3): 240–246.
- [10] 周夕良. 基于  $\mu$  律拟合的小波自适应值去噪算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, **47**(27): 141–143.
- [11] 郝继贵, 陈浩, 薛彬. 基于位置敏感探测器的激光位移传感器小波优化方法 [J]. *中国激光*, 2013, **40**(3): 0308003.
- [12] 张帅, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于激光吸收光谱技术天然气管道泄漏定量遥测方法的研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**(5): 050701.
- [13] 罗婷, 杨卫英, 丁友东. 小波变换和形态学相结合的图像融合新算法 [J]. *电视技术*, 2013, **37**(1): 48–51.

### 新闻动态 News

## 法国 Sofradir 公司推出像元间距为 10 $\mu\text{m}$ 的 Daphnis 系列红外探测器

据 [www.sofradir.com](http://www.sofradir.com) 网站报道, 法国 Sofradir 公司最近推出了像元间距为 10  $\mu\text{m}$  的 Daphnis 系列红外探测器。该探测器是世界上第一款采用小像元间距技术制成的致冷型中波红外成像产品, 它非常适合电光系统研究人员用来研制陆基、机载和舰载军事系统。

由 Sofradir 公司和法国 CEA-LETI 研究中心联合研发的 10  $\mu\text{m}$  像元间距技术使性能更高、尺寸更小的新一代红外探测器的研制成为了可能。

作为红外传感器行业的领头羊, Sofradir 公司在提供 10  $\mu\text{m}$  产品之后继续处在技术革新的最前沿。在多年的研制工作中, 这项基于碲镉汞 (MCT) 的技术已经得到了充分发展, 以至于

Sofradir 公司能够根据市场需求生产出最适合用户的产品。

Daphnis 系列探测器包括 Daphnis-XGA MW 型和 Daphnis-HD MW 型两种高性能成像产品。对于那些想要改进现有的像元间距为 15  $\mu\text{m}$  的 VGA 格式电光系统的用户来说, Daphnis-XGA MW 型探测器可以提供数量是相同光学系统两倍多的像元, 因此其探测距离和 DRI 均会有明显增加。而对于那些准备研制新型电光系统的用户来说, Daphnis-HD MW 型探测器则可提供像素更多且与最先进的 16:9 显示器相兼容的图像格式。由于 Daphnis 系列探测器在尺寸没有任何增加的前提下具有更多、更小的像元, Sofradir 公司将能以更高的分辨率满足各种用户的需求。

这两种红外探测器可以用于装甲车、直升飞机 (导航系统以及搜索与营救装备)、目标获取、成像吊舱、机载与舰载发射系统、边境侦察以及资源监测等场合。

□ 岳桢千