# 基于小波包分解的 2 种储粮害虫活动声信号分析

张严严郭敏秦昕

陕西师范大学计算机科学学院,西安 710062

摘要 采集不同温度下玉米象(Sitophilus zeamais)成虫在小麦、玉米和米象(Sitophilus oryzae)幼虫在薏 米中活动的声信号进行小波包分解,并提取分解节点的能量、能量比、能量熵均值3个特征进行分析。结果表 明:相同温度下玉米象在小麦、玉米中活动声信号的节点能量和节点能量比有差异,能得到2类信号差异的频 段;2类信号的能量熵均值差别较大,并可发现小麦和玉米不同储粮中玉米象活动声信号能量熵均值的统计规 律;不同温度下米象幼虫在薏米中活动声信号节点能量均值、节点能量比均值和能量熵均值皆存在差异;不同 温度和不同种类粮食均会影响储粮害虫活动声信号,其活动声在小波包分解特征中差异显著。

关键词 储粮害虫; 玉米象; 米象; 声信号; 小波包 中图分类号 S 433.5; TP 23 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2013)03-0135-06

粮食储藏是每个国家建设和发展的基本保证。 粮食收获后由于害虫造成的损失巨大,因此,及时有 效地检测和防治储粮害虫非常重要。利用储粮害虫 的吃食及爬行声信号检测害虫的发生情况,是近年 来发展起来的一种快速、实用的储粮害虫检测方法。 1953年 Adams 等<sup>[1]</sup>检测到受损粮食中害虫活动的 声音,引领对储粮害虫声音检测技术的研究。Vick 等[2]利用麦克风、放大器、示波器和计算机,检测到 玉米、大米和小麦样品中米象等幼虫的声信号及害 虫活动声音的最高频率。Shuman 等<sup>[3]</sup>设计了声探 测昆虫定位检测器,根据声传播时间与距离关系,实 现害虫的定位并统计其数量。Hagstrum 等<sup>[4]</sup>分别 用声音监测法和传统采样法对 Kansas 的 6 个农场 的 10 个粮仓中小麦采用远距离害虫自动声监测,证 明了声检测法能成功检测到粮仓中所有害虫。 Fleurat-Lessard 等<sup>[5]</sup>提出储粮害虫活动声谱的分类 方法,可检测害虫并识别其生长阶段,将获取的声信 号与数据库中标准声谱进行对照,实现了害虫主要 种类的识别及危害程度报警。中国储粮害虫检测大 多使用传统的取样方法[6-10],其声检测技术尚处于 起步阶段。笔者利用储粮害虫活动声信号采集装 置,采集玉米象和米象2种储粮害虫的活动声信号 进行小波包分解,并提取分解节点的能量、能量比、 能量熵均值3个特征进行分析,旨在为建立储粮害 虫声特征数据库和实现储粮害虫自动化检测提供科 学依据。

# 1 材料与方法

#### 1.1 小波包分解

小波包(wavelet packet, WP)是从小波分析延伸出来的一种对信号更精细的分析方法<sup>[11]</sup>。该方 法不仅对信号的低频部分进行分解,还对高频部分 进行分解;WP变换能够将频带进行多层次划分,实 现不同空间分辨率上的时频分析,并能根据被分析 信号的特征,实现信号的去噪、压缩、重构等,具有更 强的适应性,更适用于信号的各种处理。其实质是 对某函数 f(x)或信号 W(t)进行多尺度分析,同时 对 2 个子空间进行分解。信号 W(t)可以用递归式 进行小波包分解。

$$\begin{cases} W_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k} h(k) W_{n}(2t-k) \\ W_{2n-1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k} g(k) W_{n}(2t-k) \end{cases}$$

式中h(k)为高通滤波器组;g(k)为低通滤波器组。

#### 1.2 声信号采集

储粮害虫活动声信号采集装置图见文献[12]。

收稿日期: 2012-10-06

张严严,硕士研究生.研究方向:数字信号处理与模式识别. E-mail:zhangyan-157@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(10974130)和陕西省自然科学基金项目(2012JM1005)

通讯作者:郭 敏,博士,教授.研究方向:数字信号处理与模式识别. E-mail: guomin@snnu. edu. cn

采集时将害虫样品放入装有粮食的圆柱形玻璃粮桶 (高 20 cm、直径 10 cm),将专业麦克风(舒尔 BG 4.1型,频率响应 40~18 000 Hz)插入粮堆中。再 将粮桶和专业麦克风置于隔音箱内,以消除环境噪 声的影响。双层木质隔音箱长、宽、高均为60 cm, 专业声卡(MAYA 44,频响范围 20~20 000 Hz,最 高采样率 48 kHz,模数转换 18 bits)作为数字信号 采集的主要设备,通过专用接口与麦克风相连。

供试粮食样品为小麦、玉米、薏米 3 种,害虫样 品为米象幼虫、玉米象成虫 2 种。对温度在 24~ 29 ℃时玉米象成虫分别在小麦、玉米中的活动声和 温度在 26~29 ℃时米象幼虫在薏米中的活动声进 行采集。采样频率 11 025 Hz,每种害虫取 30 个,每 类信号至少重复采集 40 个,每个样本时间持续 1 min。因害虫爬行的随机性,故分析时从每类信号 样本中挑选出现次数最多的 20 个信号作为本类的 特征信号。

#### 1.3 声信号特征提取

储粮害虫的活动声信号包含着丰富的类别特征 信息,通过对声信号进行5层小波包分解,得到第 5层小波包分解系数,并对各个子节点系数进行重 构,从而提取各个子节点的特征,进而实现不同频段 内储粮害虫活动声信号的分析,使不甚明显的信号 特征在若干频段中以显著的变化和分布体现出来, 以便对其进行识别。试验共提取节点能量、节点能 量比、信号能量熵3个特征。

1) 节点能量。信号分解后的节点  $S_{5i}, i = 0$ , 1,…,31 对应的能量为 $E_{5i} = \sum_{k=1}^{n} |C_{5k}|^2 \cdot C_{5k}$ 为i节 点上的小波包系数, n 为系数个数<sup>[13]</sup>。

2)节点能量比。信号分解后各节点的能量比为  $P_{5i} = \frac{E_{5i}}{E}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 31$ 。 $E_{5i}$  为 i 节点的能量,  $E = \sum_{i=1}^{31} E_{5i}$  为信号的总能量。

3)信号能量熵。信息熵的大小用来表述系统的 平均不确定程度。信息熵越大,说明信号的不确定 性和随机性就越大。设 P(p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>,…p<sub>m</sub>) 是一个不 确定的概率分布, k 为任一常数,则该分布的信息熵

$$\mathfrak{H} S(P) = -k \sum_{i=1}^{m} P_i \ln P_i [14] .$$

信号时频分布表示信号在采样时间内各频率处 能量的变化,为了定量描述不同信号时频分布的变 化程度,将能量熵理论引入时频分布分析中。信号 分解后各节点能量比为 $P_{5i} = \frac{E_{5i}}{E}$ ,  $i=0,1,\dots,31$ ,由 于 $\sum_{i=0}^{31} P_{5i} = 1$ ,符合计算信息熵时的初始归一化条 件,所以信号的能量熵为 $S = -\sum_{i=1}^{31} P_{5i} \ln P_{5i}$ 。

## 2 结果与分析

将 24~29 ℃下玉米象成虫在小麦和玉米中的 活动声信号、26~29℃下米象幼虫在薏米中的活动 声信号进行 5 层小波包分解,选用 db5 作为分解的 小波包基函数,每个信号最终被分解为 32 个节点, 提取特征进行分析。

#### 2.1 玉米象成虫活动声信号的特征

1)节点能量。通过对比同一温度下玉米象成虫 分别在小麦和玉米中的活动声信号在对应分解节点 上的能量值,找出 2 类信号具有明显差异的小波包 分解节点,从而得到此温度下 2 类信号存在差异的 频段。表 1 为 24~29 ℃玉米象成虫在小麦和玉米 中的活动声信号小波包节点能量的特征对比结果。

### 表 1 玉米象成虫在小麦和玉米中活动声信号 能量差异的节点

 Table 1
 WP decomposition nodes with energy differences of

activity sound of S. zeamais adults in wheat and corn

t∕°C	小波包分解节点 WP decomposition nodes	频率范围/Hz Frequency range
24	W(5,1) W(5,3) W(5,5) W(5,7) W(5,13) W(5,15)	$172.3 \sim 516.8$ 861.3 $\sim 1$ 205.9 1 550.4 $\sim 1$ 894.9
25	W(5,1) W(5,2) W(5,7)	$172.3 \sim 344.5$ $516.8 \sim 689.1$ $861.3 \sim 1033.6$
26	W(5,2) W(5,6)	516.8~861.3
27	W(5,2) W(5,5) W(5,6) W(5,7)	516.8~1 205.9
28	W(5,6) W(5,7) W(5,15)	689.1~1 033.6 1 722.7~1 894.9
29	W(5,2) W(5,4) W(5,5) W(5,6) W(5,7) W(5,12) W(5,13) W(5,14) W(5,15)	516.8~2 067.2

图 1 中横坐标为 20 个害虫的编号,纵坐标为信 号 W(5,5)节点的能量值。由图 1 可知,玉米象成 虫在小麦中活动声信号的节点能量约为  $9 \times 10^{-3} \sim$  $12 \times 10^{-3}$ ,在玉米中活动声信号的节点能量约为  $6 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$ ,两者差别明显。





2)节点能量比。通过对比同一温度下玉米象成 虫在小麦和玉米中活动声信号在对应分解节点上的 能量比,找出2类信号具有明显差异的小波包分解 节点,可得到此温度下2类信号存在差异的频段。 表2为24~29℃玉米象成虫在小麦和玉米中活动 声信号小波包分解节点能量比的特征对比结果。

# 表 2 玉米象成虫在小麦和玉米中活动声信号

#### 能量比差异的节点

 
 Table 2
 WP decomposition nodes with energy ratio differences of activity sound of S. zeamais adults in wheat and corn

$t/^{\circ}\!\mathbb{C}$	小波包分解节点 WP decomposition nodes	频率范围/Hz Frequency range		
24	W(5,1) W(5,3) W(5,5) W(5,13) W(5,15)	$172.3 \sim 516.8$ 1 033.6~1 205.9 1 550.4~1 894.9		
25	$ \begin{array}{c} W(5,2) \ W(5,6) \ W(5,8) \\ W(5,9) \ W(5,10) \ W(5,11) \\ W(5,12) \ W(5,13) \\ W(5,14) \ W(5,15) \end{array} $	516.8~861.3 1 378.1~2 756.3		
26	W(5,2) W(5,3) W(5,5) W(5,6) W(5,7)	344.5~1 205.9		
27	无 None			
28	W(5,7)	861.3~1 033.6		
29	W(5,1)	172.3~344.5		

由图 2 可知,玉米象成虫在小麦中活动声信号 的节点能量比约为  $7 \times 10^{-3} \sim 14 \times 10^{-3}$ ,在玉米中 活动声信号的节点能量比约为  $3 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ , 两者差别明显。

3)能量熵均值。由表 3 可知,玉米象成虫在小 麦中活动声信号的能量熵平均值在 24 ℃时最大、 29 ℃时最小,说明此类信号在 24 ℃时的不确定性 和随机性较大,在 29 ℃时较为稳定;玉米象成虫在 玉米中活动声信号的能量熵平均值在 25 ℃时最大、 26 ℃时最小,说明此类信号在 25 ℃时的不确定性 和随机性较大,在26℃时较为稳定。

<b>表</b> 3	玉米象成虫在小麦和玉米中活动声信号的
	能量熵平均值

 Table 3
 Average of energy entropy of activity sound of

 S. zeamais adults in wheat and corn

粮食 Grain	24 °C	25 °C	26 °C	27 °C	28 °C	29 °C
小麦 Wheat	1.20	1.03	1.00	0.91	1.19	0.42
玉米 Corn	1.15	1.29	0.71	1.00	1.21	0.72

#### 2.2 米象幼虫活动声信号的特征

1)节点能量。对薏米中米象幼虫活动声信号进 行小波包分解,取26~29 ℃各温度下活动声信号节 点的能量均值。测定结果显示,各温度下活动声信 号所有分解节点中,W(5,1)、W(5,2)、W(5,3)、W (5,6)、W(5,7)节点能量均值较大(图3)。这5个 节点对应的频段为172.3~1033.6 Hz,其中W(5, 1)节点能量均值最大,W(5,7)节点能量均值最小, W(5,1)、W(5,7)节点对应频段分别是172.3~ 344.5 Hz、861.3~1033.6 Hz。

图 4 为 W(5,1)节点在 26~29 ℃ 各温度下的 能量值对比。在一定范围内,温度越高,信号节点 W(5,1)的能量值越大。

2)节点能量比。计算 26~29 ℃各温度下声信 号各节点的能量比均值。测定结果显示,各温度下 所有分解节点中,W(5,1)、W(5,2)、W(5,3)、W(5, 6)、W(5,7)节点能量比均值较大(图 5)。5 个节点 中W(5,1)节点的能量比均值最大,W(5,7)节点的 能量比均值最小,W(5,1)、W(5,7)节点对应频段分 别是 172.3~344.5 Hz、861.3~1 033.6 Hz。另 外,在同一节点均是 28 ℃时的能量比最大,27 ℃时 的能量比最小。



图 2 24 C 时玉米象成虫在小麦和玉米中活动声信号分解节点 W(5,5)的能量比 Fig. 2 Energy ratio comparison of WP decomposition node W(5,5) of activity sound of *S. zeamais* adults in wheat and corn at 24℃



S. oryzae larvae in coix seed at different temperatures

3)能量熵均值。测定结果显示,26、27、28、
29 ℃各温度下米象幼虫在薏米中活动声信号能量
熵的平均值分别为 0.98、0.41、1.12、0.42,其中
米象幼虫在薏米中活动声信号的能量熵均值在
28 ℃时最大、27 ℃时最小,说明此信号在 28 ℃时
的不确定性和随机性较大,在 27 ℃时较为稳定。

### 3 讨 论

本试验采集了玉米象和米象 2 种储粮害虫的活 动声信号,将小波包分解方法应用于害虫活动声信 号的特征提取,使信号无冗余、无疏漏、正交地分解 到独立的频带内,突出了声信号的主要频率成分,并 在统计意义上对声信号经小波包分解后的节点能 量、节点能量比和能量熵均值 3 方面特征进行了系 统分析。 对比同温度下玉米象成虫在小麦和玉米中的 2 类活动声信号经小波包分解后节点(以节点 W(5,5)为例)的能量和能量比特征,发现玉米象成 虫在小麦中活动声信号的节点能量约为9×10<sup>-3</sup>~ 12×10<sup>-3</sup>、能量比约为7×10<sup>-3</sup>~14×10<sup>-3</sup>,在玉米 中活动声信号的节点能量约为6×10<sup>-3</sup>~7×10<sup>-3</sup>、 能量比约为3×10<sup>-3</sup>~6×10<sup>-3</sup>,两者区别明显,2种 声信号的能量熵均值也存在显著差异。不同温度下 薏米中米象幼虫活动声信号分解后的节点能量均 值、能量比均值在一定范围内均是温度越高值越大, 且不同温度下米象活动声信号能量熵均值也明显不 同。害虫在不同粮食和温度中的活动声在小波包特 征中有显著差异,说明储粮害虫活动声特征不仅与 粮粒大小有关,更证明了粮虫活跃度也受温度影响, 在为以后的研究中通过温度来控制储粮害虫的提供







图 5 薏米中米象幼虫活动声信号各节点能量比平均值

Fig. 5 Average of energy ratio of WP decomposition nodes of activity sound of S. oryzae larvae in coix seed

了可行性。

笔者在前人的研究基础上,进一步证明了声信 号在储粮害虫检测方面的有效性,并对不同粮种和 温度下的害虫活动声信号进行小波包分解,再对分 解后的特征进行较系统分析,得到了害虫活动声信 号在不同情况下的节点能量、能量比以及能量熵特 征的差异和特点。本试验结果可为储粮害虫声特征 数据库提供信息,使其更加丰富和完善,更好地应用 于储粮害虫的早期区分和鉴别。

#### 参考文献

of grain infested internally with insects [J]. Science, 1953, 118: 163-164.

- [2] VICK K W, WEBB J C, WEAVER B A, et al. Sound detection stored-product insects that feed inside kernels of grain [J]. Journal of Economic Entomology, 1988, 81(5):1489-1493.
- [3] SHUMAN D, COFFELT J A, VICK K W, et al. Quantitative acoustical detection of larvae feeding inside kernels of grain
   [J]. Journal of Economic Entomology, 1993, 86(3): 933-938.
- [4] HAGASTRUM D W, FLINN P W, SHUMAN D. Automated monitoring using acoustical sensors for insects in farm stored wheat [J]. Economic Entomology, 1996, 89(1):211-217.
- [5] FLEURAT-LESSARD F, TOMASINI B, KOSTINE L, et al. Acoustic detection and automatic identification of insect stages activity in grain bulks by noise spectra processing through classification algorithms:9th International Working Conference on

Stored Product Protection [C]. Campinas: [s. n. ], 2006.

- [6] 耿森林,尚志远.基于害虫声频域特征的储粮害虫种类鉴别研 究[J].农业系统科学与综合研究,2005,21(4):241-243.
- [7] 耿森林,尚志远. 仓储粮食中害虫活动声的提取与频谱分析[J].西南师范大学学报,2005,30(6):1057-1060.
- [8] 郭敏,尚志远,白雅.储粮害虫微弱声信号特征提取与分析[J]. 云南大学学报,2006,28(6):497-503.
- [9] 贾春华,郭敏.粮食钻蛀性害虫米象声信号分析[J].声学技术, 2009,28(6):135-136.
- [10] 张明真,郭敏.基于 Fast ICA 算法的 2 种储粮害虫活动声信号 识别[J].华中农业大学学报,2012,31(6):778-782.
- [11] 关履泰.小波方法与应用[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [12] 秦昕,郭敏.2种储粮害虫活动声信号的检测及其功率谱分析 [J].华中农业大学学报,2012,31(5):656-660.
- [13] 衡玲燕,戴鹏,符晓,等.基于小波包频带——能量重构的电机 断条故障诊断[J].电机与控制应用,2010,37(10):56-60.
- [14] 王清亮,付周兴.基于能谱熵测度的自适应单相接地故障选线 方法[J].电力系统自动化,2012,36(5):103-111.

# Analysis of insects activity sound in stored grain based on wavelet packet decompose

ZHANG Yan-yan GUO Min QIN Xin

College of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

**Abstract** The activity sounds of Sitophilus zeamais adults in wheat, corn and Sitophilus oryzae larvae in coix seed were respectively sampled in different temperatures, and decomposed by wavelet packet. Three characteristics of decomposition nodes were analyzed. They were nodes energy, nodes energy ratio and energy entropy. The research found that the nodes energy and nodes energy ratio of the activity sound of Sitophilus zeamais adults in wheat and corn were greatly different in the same temperature, and the difference of frequency distribution between these two types of signals was obtained. It was also found that there was much difference between the energy entropy of these two types of signals, and the activity acoustic signal energy entropy mean statistical data of Sitophilus zeamais in wheat and corn were collected. In different temperatures, the nodes energy, nodes energy ratio and energy entropy of the activity sound of Sitophilus oryzae larvae in coix seed were also different. The results show that both the difference of temperature and grain species affect the activity sound characteristics of grain insects, and the activity sounds in wavelet packet decomposed characteristics are significant different.

Key words stored grain insects; Sitophilus zeamais; Sitophilus oryzae; activity sound; wavelet packet

(责任编辑:陈红叶)