

基于小波谱白化与自适应小波重构的木材损伤声发射源 直线定位法研究

李晓崧,邓婷婷,王明华,李 明*

(西南林业大学 机械与交通学院,云南 昆明 650224)

摘 要:针对木材断裂声发射(acoustic emission, AE)信号源定位问题,提出了一种基于小波谱白化与信号相关性分析的木材表面 AE 源直线定位算法。首先,为得到木材断裂时产生的 AE 信号,使用万能力学试验机进行三点弯曲加载试验,在试件表面相距固定距离的 3 个位置采集试件断裂时产生的 AE 信号,设置采样率为 500 kHz。然后,为合理补偿 AE 信号在传播过程中损失的高频部分提升信号分辨率,提出一种小波谱白化算法。为降低噪声信号的影响,提出了一种自适应的小波重构算法。最后,通过信号相关性分析法,计算信号到达各传感器的传播时差,并采用基于时差直线定位算法进行 AE 源定位。结果表明,木材断裂过程中,AE 信号通过木材表面和木材内部 2 种途径传播,由于传播介质不同造成不同的传播速度。使用原始、小波谱白化重构、自适应小波重构的 3 种 AE 信号进行 AE 源定位时,木材表面 AE 源的定位误差为 11.3%、2.6%、3.7%,木材内部 AE 源的定位误差为 10.7%、2.9%、4.5%。AE 信号的重构算法直接影响基于时差的 AE 源定位算法精度,特别是使用小波谱白化法能够显著提升 AE 信号分辨率同时提升计算时差的准确性进而提升 AE 源定位精度。

关键词:声发射;樟子松;小波谱白化法;自适应小波重构法;信号相关分析法

中图分类号:S781.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0218-07

Linear Positioning Method of Acoustic Emission Source of Wood Fracture Based on Wavelet Spectral Whitening and Adaptive Wavelet Reconstruction

LI Xiao-song, DENG Ting-ting, WANG Ming-hua, LI Ming*

(College of Mechanical and Manufacturing Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Aiming at the issue of localization of acoustic fracture (AE) signal source of wood, a linear positioning algorithm of AE source based on wavelet whitening and signal correlation analysis was proposed. First, in order to obtain the AE signal, the study used a universal testing machine to perform the three-point bending load test, collecting the AE signal generated when the test piece breaks at three positions at a fixed distance from the surface of the test piece and set the sampling rate to 500 kHz. Then, in order to reasonably compensate the high-frequency part of the loss of the AE signal during the propagation process and improve the signal resolution, a wavelet spectrum whitening algorithm was proposed. In order to reduce the influence of noise signals, an adaptive wavelet reconstruction algorithm was proposed. Finally, through the signal correlation analysis method, the propagation time difference of the signal reaching each sensor was calculated, and the AE source positioning was carried out by using the time difference linear positioning algorithm. The experimental results showed that during the process of wood fracture, the AE signal propagated through the wood surface and the interior of the wood. Due to the different propagation media, different

收稿日期:2020-06-08 修回日期:2020-07-13

基金项目:国家自然科学基金(31760182, 31100424);云南省教育厅科学研究基金(2020Y0376)。

作者简介:李晓崧。研究方向:木材无损检测。E-mail: w605035677@163.com

*通信作者:李明,教授,博士。研究方向:木材无损检测。E-mail: swfu_lm@swfu.edu.cn

propagation speeds were resulted When using three kinds of AE signals of original, wavelet spectrum whitening reconstruction and adaptive wavelet reconstruction to locate the AE source, the positioning results of the AE source on the wood surface were 11.3%, 2.6%, and 3.7%, and the positioning results of the AE source inside the wood were 10.7%, 2.9%, 4.5%, respectively. The reconstruction algorithm of the AE signal directly affects the accuracy of the AE source positioning algorithm based on the time difference. In particular, the use of the wavelet spectrum whitening method can significantly improve the resolution of the AE signal and the accuracy of the calculated time difference, thereby improving the AE source positioning accuracy.

Key words: acoustic emission; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; wavelet spectrum whitening method; adaptive wavelet reconstruction method; signal correlation analysis method

木材作为一种天然可再生材料已经广泛运用于生产、生活中,但木材在生长、加工、运输过程中容易产生缺陷、损伤,若及时发现并采取相关处理措施将威胁人们的生命财产安全。声发射检测技术(acoustic emission test, AET)作为一种主动的无损检测技术已经广泛运用于石材、木材、金属以及合成材料的损伤、缺陷检测^[1-2]。材料损伤、断裂过程中伴随着大量 AE 信号产生,确定 AE 信号的位置就能确定材料损伤、断裂的区域并及时采取处理措施。时差定位法(time difference of arrival, TDOA)是常用的 AE 源定位法,主要原理是根据时差计算法确定 AE 信号到达各传感器的传播时差,在此基础上根据各传感器的位置关系确定 AE 源的位置。常用的时差计算法是信号相关性分析法、自适应延时估计、阈值法、峰值分析法^[3-7]。由于原始 AE 信号中含有大量噪声信号对计算时差的准确性造成的影响进而影响定位精度,所以在计算时差之前需要对原始 AE 信号进行降噪处理,常用的降噪方法是小波分析法^[8-12]。因声波信号的传播特性以及木材的天然多孔性,AE 信号在木材表面或内部的传播过程中损失了高频部分,降低的信号分辨率进而导致计算时差的准确性下降,所以在计算时差之前需要对原始 AE 信号中损失的高频部分进行合理补偿提升信号分辨率。小波谱白化法是能够合理补偿 AE 信号高频部分提升信号分辨率的有效方法之一,其原理是将 AE 信号进行傅里叶变换,由时域变换到频域。在有效的频域范围内对信号进行频率补偿,再进行傅里叶反变换,由频域变换到时域得到具有高分辨率的 AE 信号^[13-15]。目前小波谱白化法主要用于地震信号的研究中,在木材断裂 AE 信号的相关研究中鲜有涉及。

本研究以樟子松为试验对象,研究木材断裂时产生的 AE 信号源定位问题,为得到木材断裂时产生的 AE 信号,通过万能力学试验机进行三点弯曲加载试验。为合理补偿 AE 信号在传播过程中损失

的高频部分、提升 AE 信号的分辨率,提出了一种小波谱白化重构算法。为减少噪声信号的影响,采用信号相关性分析法计算信号到达各传感器之间的传播时差以及传播速度。使用不同算法重构的 AE 信号以及基于时差的直线定位算法进行 AE 源定位,通过比较定位结果,验证小波谱白化法对提升 AE 源定位精度的积极作用。

1 材料与方法

1.1 材料及设备

选择气干后的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)为试验材料,规格为 800 mm×60 mm×30 mm(长×宽×高),密度 ρ 为 $0.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,含水率为 12.8%,由哲耀家装建材公司提供。采用 UTM5105 型电子万能力学试验机(jinan kason testing equipment Co., Ltd)对试件进行三点弯曲加载试验,加载速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,跨距设置为 240 mm。基于 NI USB-6366 高速采集卡和 LabVIEW 软件搭建三通道 AE 信号采集系统,各通道的采集电压幅值设置为(-5 V, 5 V),最高采样率可以设置为 2 MHz。传感器的型号为 SR150N,带宽为 22~220 kHz,通过压力效应工作,前置放大器增益为 40 dB。文献[16]中表明木材损伤时产生的 AE 信号频率集中在 100~200 kHz,木材断裂时产生的 AE 信号频率主要集中在 65~120 kHz,根据香浓采样定理设置采样率为 500 kHz。

1.2 试验方法

由图 1 可见,三点弯曲加载试验中 2 个支撑点的间距 d 为 240 mm,受压点设置在传感器 S_1 右侧 50 mm 处,即 $a=50 \text{ mm}$ 。以传感器 S_1 和 S_3 构成直线的中点为原点,传感器 S_1 到 S_3 的方向为正向建立一维坐标系,传感器 S_1 与 S_2 之间的间距 b 为 200 mm,传感器 S_2 和 S_3 之间的间距 c 为 300 mm。通过计算 AE 信号到达传感器 S_2 与 S_3 的传播时差计算 AE 信号在樟子松顺纹理方向的传播速度,利

用 AE 信号到达传感器 S_1 与 S_3 的传播时差、AE 信号在木材顺纹理方向的传播速进行 AE 源定位。为消除随机性的影响,根据文献[17]的分类法将木材损伤过程中的 AE 信号按频率数值大小分为 DAE (Deformation AE)和 FAE(Fracture AE)两类;当

木材纤维断裂时产生 DAE 信号,其频率范围为 30 ~60 kHz,当木材宏观断裂时产生 FAE 信号,其频率范围为 160~170 kHz,从同一试件实际损伤信号中选出 10 个独立 DAE 信号进行 AE 源定位。

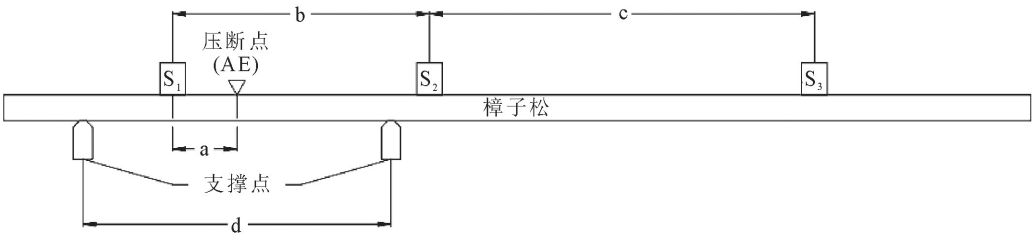


图 1 三点弯曲加载试验传感器位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the position of the three-point bending load test sensor

1.3 自适应小波重构法与小波谱白化法

由于木材断裂产生的 AE 信号中含有大量噪声信号以及 AE 信号高频部分因木材的天然多孔性和声波信号的传播特性而损失导致信号分辨率下降,进而对 AE 源的定位精度造成影响,所以在进行 AE 源定位前,需要对原始 AE 信号进行降噪处理和合理补偿 AE 信号高频部分,提升 AE 信号的分辨率进而提升计算时差的准确性和 AE 源定位精度。本研究分别采用自适应小波重构法和小波谱白化法重构 AE 信号,并通过比较不同方法确定的 AE 源定位结果验证小波谱白化法提升信号分辨率的效果。

1.3.1 自适应小波重构法 设原始 AE 信号为 $X(i)$,对原始 AE 信号 $X(i)$ 进行低通滤波,得到滤波后的 AE 信号 $H(i)$ 。选择 *daubechies* 小波(*db10*)作为小波基函数对信号 $H(i)$ 进行 10 层小波分解并重构各层信号,得到重构的各层信号 $M_j(i)(j=1,\cdots,10)$,使用信号相关性分析法计算滤波后的 AE 信号 $H(i)$ 与重构后各层信号 $M_j(i)(j=1,\cdots,10)$ 的相关系数,按相关系数由大到小的顺序重新排列各层信号 $M_j(i)(j=1,\cdots,10)$ 。依次叠加信号 $M_j(i)(j=1,\cdots,10)$ 得到叠加后得信号 $N(i)$,为保证重构后的信号更多地保留 AE 信号成分,在叠加过程中,引入相似度参数,即叠加后得信号 $N(i)$ 与滤波后得信号 $H(i)$ 相似度 \geq 设定值时,视为完成 AE 信号的波形重构,设定值 $k=0.85$ 。

1.3.2 小波谱白化法 设原始 AE 信号为 $X(i)$,对原始 AE 信号 $X(i)$ 进行高通滤波,得到滤波后的 AE 信号 $H(i)$ 。选择 *daubechies* 小波(*db10*)作为小波基函数对信号 $H(i)$ 进行 5 层小波分解,得到频域信号 $G_j(i)(j=1,2,3,4,5)$,根据式(1)求出每层频域信号的均方根 $A_j(j=1,2,3,4,5)$ 。

$$A_j=\sqrt{\frac{1}{nf+1}\sum_{i=1}^nG_j(i)^2} \tag{1}$$

式中, n 为采样数, f 为采样率。

对各层频域信号进行谱白化处理:

$$B_j(i)=\frac{G_j(i)}{A_j}\times C \tag{2}$$

式中, $B_j(i)(j=1,2,3,4,5)$ 为谱白化处理后的频域信号; C 为常数因子。

对各层信号 $B_j(i)(j=1,2,3,4,5)$ 进行小波重构并叠加得到具有高分辨率的 AE 信号 $Y(i)$ 。

1.4 木材表面和内部传播 AE 信号区分方法

受传播介质的影响,AE 信号在木材表面和内部传播时,传播速度存在明显差异,文献[7]中表明,当 AE 信号在木材表面传播时,传播速度的变化范围为 900~1 400 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,当 AE 信号在木材内部传播时,可根据固体内部的声波信号传播速度计算公式(3)计算 AE 信号的传播速度。

$$v=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3}$$

式中, E 为材料的弹性模量, ρ 为材料的密度。

顺纹木材的弹性模量的范围为 9.8~12 GPa ^[18],气干状态的樟子松密度变化为 0.4~0.6 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,代入式(3)中可以得到 AE 信号在樟子松内部的传播速度为 4 041~5 477 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据计算得到的 AE 信号传播速度数值大小判断 AE 信号的传播介质,先根据式(4)计算 AE 信号传播速度,再根据木材表面和内部 AE 信号传播速度变化范围以及传播速度的大小判断 AE 信号的传播介质。

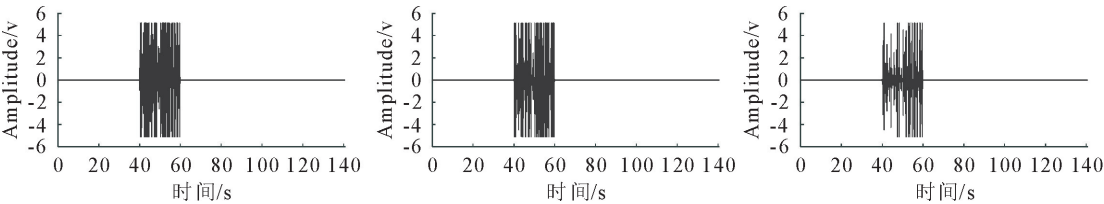
$$v=\frac{x_1-x_3}{t} \tag{4}$$

式中, x_1 为 AE 源与传感器 S_1 的距离; x_3 为 AE 源与传感器 S_3 的距离; t 为 AE 信号到达传感器 S_1 与 S_3 的传播时差。

共采集了 142 s 的木材断裂 AE 信号,从 40~

60 s 时段内选取 10 个独立 DAE 信号进行 AE 源定位,图 2 为 40~60 s 时段 AE 信号时域图。由图 2 可知,传感器 S_3 所采集到的信号衰减最明显,故选取传感器 S_3 采集到的 2 组 DAE 信号展示自适应小

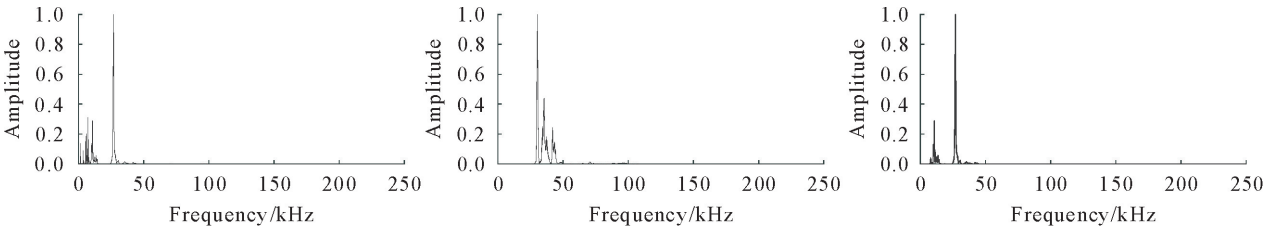
波重构法和小波谱白化重构法的效果,传感器 S_1 与 S_2 采集到的 AE 信号情况类似,在此不在赘述。图 3、4 分别为木材表面传播 AE 信号幅频图和木材内部传播 AE 信号幅频图。



注:a)传感器 S_1 ;b)传感器 S_2 ;c)传感器 S_3 。

图 2 40~60 s 时段 AE 信号时域图

Fig. 2 Time domain diagram of AE signal in the period from 40 s to 60 s



注:a)原始 AE 信号;b)小波谱白化法重构 AE 信号;c)自适应小波重构 AE 信号。下同。

图 3 木材表面传播 AE 信号幅频

Fig. 3 Amplitude and frequency diagram of AE signal propagating on the surface of wood

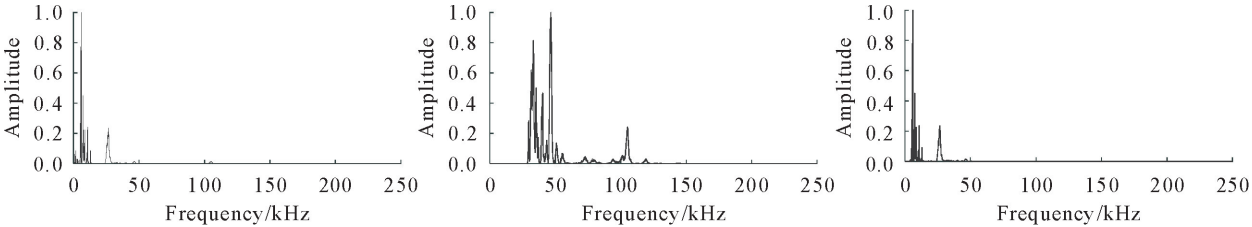


图 4 木材内部传播 AE 信号幅频

Fig. 4 Amplitude and frequency diagram of AE signal propagating inside wood

1.5 信号相关性分析

采用信号相关性分析法计算信号到达 2 个传感器的传播时差以及 AE 信号传播速度。信号相关性函数描述 2 个信号的相似程度,信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相关性函数定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \tag{5}$$

根据相关性函数的定义可知,若 $\tau=\tau_0$ 时,相关性函数的绝对值 $|R_{xy}(\tau_0)|$ 取最大值,则当信号 $y(t)$ 沿时间轴平移 τ_0 个单位后,与信号 $x(t)$ 最相似。通过相关性函数和采样率可以间接确定 AE 信号到达 2 个传感器的传播时差 Δt 。

1.6 直线定位算法

AE 信号在樟子松顺纹理方向的传播速度可由式(6)计算得到:

$$v_{23} = \frac{x_{23}}{t_{23}} \tag{6}$$

式中, x_{23} 为传感器 S_2 和 S_3 之间的间距; t_{23} 为 AE 信号到达传感器 S_2 和 S_3 的传播时差。

AE 源的位置可以由基于时差的直线定位公式确定:

$$x = \frac{1}{2} v_{23} \Delta t \tag{7}$$

式中, x 为 AE 源的坐标; v_{23} 为 AE 信号在樟子松顺纹理方向的传播速度; Δt 为 AE 信号达到传感器 S_1 和 S_3 的传播时差。

AE 源的定位误差 δ 由式(7)计算可得:

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \tag{8}$$

式中, x_0 为实际 AE 源坐标,即受压点的位置。

采用了 I、II、III 3 种直线定位法进行 AE 源定

位,并比较定位结果。直线定位法Ⅰ中,直接对原始 AE 信号使用信号相关性分析法计算时差 Δt_{I} 和速度 v_{I} ,并代入式(7)、(8)中计算 AE 源位置 x_{I} 以及误差 δ_{I} 。直线定位法Ⅱ中,先对原始 AE 信号进行小波谱白化处理,合理补偿原始 AE 信号中缺失的高频部分同时降低噪声信号的影响,得到具有高分辨率的 AE 信号,再对处理后的 AE 信号进行信号相关性分析计算 Δt_{II} 和速度 v_{II} ,并代入式(7)、(8)中计算 AE 源位置 x_{II} 以及误差 δ_{II} 。直线定位法Ⅲ中,先对原始 AE 信号进行自适应小波重构降低噪声信号的影响,再对重构后的 AE 信号使用信号相关性分析计算 Δt_{III} 和速度 v_{III} ,并代入式(7)、(8)中计算 AE 源位置 x_{III} 以及误差 δ_{III} ^[7]。其中, v_{I} 、 v_{II} 、 v_{III} 使用式(6)计算得到。

2 结果与分析

信号的传播时差是影响时差定位算法精度的重要参数,传播时差的准确性将直接影响 AE 源的定位精度。本研究采用小波谱白化法对 AE 信号在传播过程中损失的高频部分进行合理补偿,同时提升了信号分辨率和计算时差的准确性进而提升 AE 源的定位精度。

木材在断裂过程中伴随着大量 AE 信号产生,AE 信号主要通过木材表面和内部 2 种途径传播,因传播介质存在差异导致 AE 信号的传播速度不同。表 1 中列出经 2 种介质传播的 AE 信号传播速度, v_{I} 、 v_{II} 、 v_{III} 和 v_{I}' 、 v_{II}' 、 v_{III}' 分别表示使用直线定位法Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ计算得到 AE 信号在木材表面和木材内部的传播速度。

由表 1 中列出的数据可计算出 AE 信号在木材表面的传播速度 v_{I} 、 v_{II} 、 v_{III} 的均值分别为 1 094.0、1 151.3、1 275.0 m·s⁻¹,通过木材断裂产生的 AE 信号在木材表面的传播速度与文献[7]中铅芯折断产生的 AE 信号在木材表面的传播速度在数值上相近。AE 信号在木材内部的传播速度 v_{I}' 、 v_{II}' 、 v_{III}' 均值分别为 4 854.4、4 662.6、4 835.5 m·s⁻¹。

表 2 中列出了 AE 信号到达传感器 S₁ 和 S₃ 的传播时差, Δt_{I} 、 Δt_{II} 、 Δt_{III} 和 $\Delta t_{\text{I}}'$ 、 $\Delta t_{\text{II}}'$ 、 $\Delta t_{\text{III}}'$ 分别表示使用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 种直线定位法确定的 AE 信号在木材表面和木材内部的传播时差, Δt_{I} 、 Δt_{II} 、 Δt_{III} 和 $\Delta t_{\text{I}}'$ 、 $\Delta t_{\text{II}}'$ 、 $\Delta t_{\text{III}}'$ 的标准差分别为 62.5、11.8、14.3 μs 和 10.3、1.2、6.5 μs。AE 信号在木材表面的传播时,传播时差 Δt_{I} 的标准差大于 Δt_{III} 、 Δt_{II} 的标准差,而 Δt_{III} 、 Δt_{II} 的标准差数值上相近,这说明自适应小波重构算法和小波谱白化算

法能够消除部分噪声信号的影响,提升信号分辨率。AE 信号在木材内部的传播时差 $\Delta t_{\text{III}}'$ 的标准差小于 $\Delta t_{\text{I}}'$ 的标准差,这说明自适应小波重构算法能够有效的消除部分噪声信号的影响,而传播时差 $\Delta t_{\text{III}}'$ 的标准差大于 $\Delta t_{\text{II}}'$ 的标准差,这说明 AE 信号在传播过程中损失的高频部分也是影响木材内部 AE 信号传播时差计算精度的因素之一,使用小波谱白化法对高频缺失部分进行合理补偿后,可以有效提升计算时差的准确性。

表 1 AE 信号在木材表面或内部的传播速度

Table 1 AE signal propagation speed on or inside the wood

(m·s⁻¹)

序号	v_{I}	v_{II}	v_{III}	v_{I}'	v_{II}'	v_{III}'
1	949.3	1 134.6	1 229.5	4 571.4	4 687.5	5 357.1
2	1 171.9	1 171.9	1 171.9	5 000.0	4 411.8	4 411.8
3	1 111.1	1 119.4	1 329.5	5 555.5	4 411.8	4 166.7
4	967.7	1 153.8	1 239.7	4 285.7	4 687.5	4 687.5
5	1 153.8	1 127.8	1 153.8	4 838.7	4 687.5	5 357.1
6	1 111.1	1 171.9	1 250.0	5 357.1	4 687.5	4 687.5
7	846.5	1 145.0	1 381.0	4 411.8	4 687.5	5 000.0
8	1 111.1	1 162.8	1 250.0	5 357.1	4 687.5	5 000.0
9	1 063.8	1 171.9	1 274.3	5 000.0	4 838.7	5 000.0
10	1 453.8	1 153.8	1 470.6	4 166.7	4 838.7	4 687.5

表 2 AE 信号到达传感器 S₁ 和 S₃ 的传播时差

Table 2 The propagation time difference of the AE signal reaching the sensors S₁ and S₃

序号	Δt_{I}	Δt_{II}	Δt_{III}	$\Delta t_{\text{I}}'$	$\Delta t_{\text{II}}'$	$\Delta t_{\text{III}}'$
1	392	334	312	100	82	82
2	348	338	286	74	82	94
3	208	338	308	100	86	74
4	428	360	328	90	84	90
5	422	348	306	80	84	80
6	324	368	332	80	84	92
7	398	368	336	76	84	94
8	402	342	324	76	82	92
9	316	350	312	94	84	84
10	358	342	306	74	84	92

表 3、表 4 分别列出了使用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 种直线定位法确定的木材表面 AE 源和木材内部 AE 源定位结果。 x_{I} 、 x_{II} 、 x_{III} 和 δ_{I} 、 δ_{II} 、 δ_{III} 分别表示木材表面 AE 源的定位结果以及对应的定位误差, x_{I}' 、 x_{II}' 、 x_{III}' 和 δ_{I}' 、 δ_{II}' 、 δ_{III}' 分别表示木材内部 AE 源的定位结果以及对应的定位误差。 v_{I}^* 、 v_{II}^* 、 v_{III}^* 和 $v_{\text{I}}'^*$ 、 $v_{\text{II}}'^*$ 、 $v_{\text{III}}'^*$ 分别为将表 2 中的传播时差 Δt_{I} 、 Δt_{II} 、 Δt_{III} 和 $\Delta t_{\text{I}}'$ 、 $\Delta t_{\text{II}}'$ 、 $\Delta t_{\text{III}}'$ 代入式(4)中计算得到的 AE 信号在木材表面和内部的传播速度,并根据 v_{I}^* 、 v_{II}^* 、 v_{III}^* 和 $v_{\text{I}}'^*$ 、 $v_{\text{II}}'^*$ 、 $v_{\text{III}}'^*$ 的数值大小判断 AE 信号的传播介质。

从表 3、4 中可计算得知,木材表面 AE 源定位误差 δ_{I} 、 δ_{II} 、 δ_{III} 和木材内部 AE 源定位误差 δ_{I}' 、 δ_{II}' 、 δ_{III}' 的均值分别为 11.3%、2.6%、3.7% 和 10.7%、2.9%、4.5%。比较定位误差 δ_{I} 、 δ_{III} 或 δ_{I}' 、 δ_{III}' 可以得知,噪声信号是影响木材表面 AE 源定位精度的因素之一,使用自适应小波重构算法对原始 AE 信号进行降噪处理再进行 AE 源定位,AE

源的定位精度提高了。比较定位误差 δ_{I} 、 δ_{II} 或 δ_{I}' 、 δ_{II}' 可以得知,AE 信号在传播过程中损失的高频部分也是影响木材表面 AE 源定位精度的因素,使用小波谱白化合理补偿 AE 信号在传播过程中损失的高频部分后再进行 AE 源定位,能够有效提升定位精度。

表 3 木材表面 AE 源定位结果
Table 3 AE source location results on wood surface

序号	v_{I}^* /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_{II}^* /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_{III}^* /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	x_{I} /mm	δ_{I} /%	x_{II} /mm	δ_{II} /%	x_{III} /mm	δ_{III} /%
1	1 020.4	1 197.6	1 282.1	−214.4	7.2	−192.3	3.8	−198.9	0.5
2	1 149.4	1 183.4	1 398.6	−190.4	4.8	−194.6	2.7	−182.3	8.8
3	1 388.9	1 183.4	1 298.7	−157.5	21.2	−194.6	2.7	−196.4	1.8
4	934.5	1 111.1	1 219.5	−234.1	17.0	−207.2	3.6	−209.1	4.5
5	947.8	1 149.4	1 307.2	−230.8	15.4	−200.3	0.1	−195.1	2.4
6	1 234.6	1 087.0	1 204.8	−177.2	11.3	−211.8	5.9	−211.7	5.8
7	1 005.0	1 087.0	1 190.5	−217.7	8.8	−211.8	5.9	−214.2	7.1
8	995.0	1 169.6	1 234.6	−219.9	9.9	−196.9	1.5	−206.6	3.2
9	1 265.8	1 142.9	1 282.1	−172.9	15.3	−201.5	0.1	−198.9	0.5
10	1 117.3	1 169.6	1 307.2	−195.8	2.0	−196.9	0.2	−195.1	2.4

表 4 木材内部 AE 源定位结果
Table 4 AE source location results in wood

序号	$v_{\text{I}}'^*$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\text{II}}'^*$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\text{III}}'^*$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	x_{I}' /mm	δ_{I}' /%	x_{II}' /mm	δ_{II}' /%	x_{III}' /mm	δ_{III}' /%
1	4 000.0	4 878.0	4 878.0	−242.7	21.3	−191.2	4.4	−198.2	0.9
2	5 405.4	4 878.0	4 255.3	−179.6	10.1	−191.2	4.4	−227.2	13.5
3	4 000.0	4 651.2	5 405.4	−242.7	21.3	−208.7	4.3	−178.8	10.5
4	4 444.4	4 761.9	4 444.4	−218.4	9.2	−195.8	2.0	−217.5	8.7
5	5 000.0	4 761.9	5 000.0	−194.2	2.9	−195.8	2.0	−193.3	3.3
6	5 000.0	4 761.9	4 347.8	−194.2	2.9	−195.8	2.0	−222.3	11.1
7	5 263.2	4 761.9	4 255.3	−184.5	7.7	−195.8	2.0	−227.2	13.5
8	5 263.2	4 878.0	4 347.8	−184.5	7.7	−191.2	4.4	−222.3	11.1
9	4 255.3	4 761.9	4 761.9	−228.2	14.0	−195.8	2.0	−203.0	1.5
10	5 405.4	4 761.9	4 347.8	−179.6	10.1	−195.8	2.0	−222.3	11.1

3 结论

由于声波信号的传播特性以及木材的天然多孔性,AE 信号在木材表面或内部传播的过程中损失了高频部分,降低了信号分辨率同时降低了计算时差的准确性进而影响定位精度。为此,本研究使用小波谱白化法合理补偿原始 AE 信号中损失的高频部分提升信号分辨率,同时针对噪声信号的随机性,采用信号相关性分析法计算 AE 信号到达各传感器的传播时差,以此提升 AE 源的定位精度。

木材断裂时 AE 信号通过木材表面和木材内部进行传播,因传播介质不同导致传播速度不同,为此本研究分别对木材表面 AE 源和木材内部 AE 源进行直线定位。当 AE 信号在木材表面和内部传播

时,I、II、III 3 种直线定位法的定位误差分别是 11.3%、2.6%、3.7%和 10.7%、2.9%、4.5%,噪声信号和 AE 信号的高频缺失是影响 AE 源定位精度的主要因素。使用自适应小波重构算法能够有效的降低噪声信号的影响,提升 AE 源定位精度,而使用小波谱白化法能够合理补偿 AE 信号在传播过程中损失的高频部分,显著提升 AE 信号的分辨率,同时提升计算时差的准确性进而提升 AE 源定位精度。未来还可以将小波谱白化和信号相关性分析相结合的方法用于材料内部 AE 源定位研究中,合理补偿原始 AE 信号中损失的高频部分,提升定位精度。

参考文献:
[1] ZHAO J H,SHI Y K,SHAN N,*et al.* Stabilized fiber-optic

extrinsic fabry-perot sensor system for acoustic emission measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(6): 874-880.

[2] SATOUR A, MONTRESOR S, BENTAHAR M, *et al.* Acoustic emission signal denoising to improve damage analysis in glass fibre-reinforced composites[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2014, 29(1): 1-15.

[3] 申珂楠, 丁馨曾, 赵海龙, 等. 木材表面声发射信号源的三角形定位方法[J]. 东北林业学报, 2015, 43(4): 77-81, 112. SHEN K N, DING X Z, ZHAO H L, *et al.* Acoustic emission signal source localization in wood surface with triangle positioning method[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(4): 77-81, 112. (in Chinese)

[4] 刘国清. 基于小波变换的岩体声发射源定位研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(4): 75-77.

[5] DIRK A, ALEX C, STEVE W, *et al.* Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 30(7): 91-102.

[6] 袁梅, 商富凯, 董韶鹏. 基于经验小波变换的复合材料板声发射源定位[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1395-1401. YUAN M, SHANG F K, DONG S P. Acoustic emission source localization of composite plate based on empirical wavelet transform[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1395-1401. (in Chinese)

[7] 李晓崧, 邓婷婷, 王明华, 等. 基于小波与相关性分析的木材声发射源直线定位算法改进[J]. 林业工程学报, 2020, 5(3): 138-143. LI X S, DENG T T, WANG M H, *et al.* Linear positioning of wood acoustic emission source based on wavelet and signal correlation [J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(3): 138-143. (in Chinese)

[8] 李新慈, 鞠双, 罗廷芳, 等. 马尾松胶合木胶层对声发射信号传播特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 185-190, 239. LI X C, JU S, LUO T F, *et al.* Influence of adhesive layer at masson pine glulam on acoustic emission signal propagation characteristics[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 185-190, 239. (in Chinese)

[9] 董红平, 李明. 基于瞬时频率的木材声发射事件辨识与损伤监测[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 229-234. DONG H P, LI M. Wood acoustic emission event identification based on instantaneous frequency and damage monitor [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 229-234. (in Chinese)

[10] 金中薇, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于广义互相关时延估计算法的声发射定位技术[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1513-1518. JIN Z W, JIANG M S, SUI Q M, *et al.* Acoustic emission localization technique based on generalized cross-correlation time difference estimation algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(11): 1513-1518. (in Chinese)

[11] PEARSON M R, EATON M, FEATHERSTON C, *et al.* Improved acoustic emission source location during fatigue and impact events in metallic and composite structures[J]. Structural Health Monitoring, 2017, 16(4): 382-399.

[12] 申珂楠, 赵海龙, 丁馨曾, *et al.* 基于 LabVIEW 的木材声发射信号采集与小波析取[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 125-129. SHEN K N, ZHAO H L, DING X Z, *et al.* Wood acoustic emission signal acquisition and wavelet extraction based on LabVIEW[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(4): 125-129. (in Chinese)

[13] 陈传仁, 周熙襄. 小波谱白化方法提高地震资料的分辨率[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(6): 703-709, 820.

[14] 王凯明, 鲁来玉, 刘庆华, 等. 基于地震背景噪声互相关函数研究介质衰减综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 112-124. WANG K M, LU L Y, LIU Q H, *et al.* Review on the research of earth's attenuation based on the ambient seismic noise crosscorrelation function[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 112-124. (in Chinese)

[15] 丁进杰, 戴永寿, 张亚南, 等. 基于高频补偿方法提高地震资料分辨率的初步研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3214-3221. DING J J, DAI Y S, ZHANG Y N, *et al.* Improving seismic data resolution based on high frequency compensation [J]. Progress in Geophys, 2013, 28(6): 3214-3221. (in Chinese)

[16] 申珂楠, 赵海龙, 丁馨曾, 等. 木材损伤断裂过程声发射信号小波析取[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 36(3): 33-37, 6. [17] LI X C, LI M, JU S. Frequency domain identification of acoustic emission events of wood fracture and variable moisture content[J]. Forest Products Journal, 2020, 70(1).

[18] 胡中, 王亚军, 倪忠仁, 等. 实用机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 718-719.