



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107807388 B

(45)授权公告日 2019.06.07

(21)申请号 201711062435.9

(22)申请日 2017.11.02

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107807388 A

(43)申请公布日 2018.03.16

(73)专利权人 辽宁工程技术大学
地址 123000 辽宁省阜新市细河区中华路
47号

(72)发明人 李启成

(74)专利代理机构 沈阳东大知识产权代理有限公司 21109

代理人 朱光林

(51)Int.Cl.
G01V 1/30(2006.01)

(56)对比文件

- US 2014067273 A1, 2014.03.06, 全文.
- CN 103412331 A, 2013.11.27, 全文.
- CN 1139973 A, 1997.01.08, 全文.
- CN 105467428 A, 2016.04.06, 全文.
- CN 104335072 A, 2015.02.04, 全文.
- CN 105866835 A, 2016.08.17, 全文.
- CN 102798891 A, 2012.11.28, 全文.
- CN 102879813 A, 2013.01.16, 全文.

李启成等.断层滑动速度的研究.《地球物理学进展》.2016,第31卷(第1期),第442-448页.

审查员 李振振

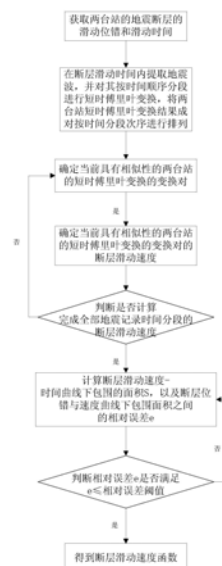
权利要求书2页 说明书11页 附图12页

(54)发明名称

一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法

(57)摘要

本发明公开一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法。包括：获取两台站的地震断层的滑动位错和滑动时间；在断层滑动时间内选择时间窗提取地震波，并对其进行短时傅里叶变换；确定具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对；确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度；确定断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差；得到断层滑动速度函数。本发明无需掌握地壳介质参数，只需掌握震源位置、地震记录、记录台站位置信息，因此物理意义清晰。本发明增强了滑动速度时间定位、计算断层滑动速度的准确性，得到的地震断层的滑动速度具有突然上升，迅速下降的特点。



1. 一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:获取两台站的地震断层的滑动位错和滑动时间;

步骤2:在地震断层滑动时间内提取地震波,按时间分段进行短时傅里叶变换:在两台站的地震记录中,在断层滑动时间内选择时间窗提取地震波,并对全部断层滑动时间内的地震记录按时间顺序进行短时傅里叶变换,将两台站短时傅里叶变换结果成对按时间分段次序进行排列;

步骤3:按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,确定时间分段上的两台站地震波在选定窗宽内的相似性,确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对,具体过程如下:

按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,固定在第一个台站的短时傅里叶变换频谱上;在第二个台站的短时傅里叶变换频谱上以同样的窗宽,同样的步长进行滑动,计算两台站地震在该时间分段上的记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m ,若当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的值小于等于相似性阈值时,则当前时间分段上两台站接收到的地震波地震记录有相似性;若当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的值大于相似性阈值时,以同样的窗宽,同样的步长继续在第二个台站短时傅里叶变换频谱上滑动,计算两台站地震记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m ,直到在当前时间分段上第二个台站短时傅里叶变换频谱的全部滑动完成,若依然不具有相似性,选定下一时间分段的两台站的短时傅里叶变换的变换对,直至两台站地震记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m 的值小于等于相似性阈值,即确定当前两台站地震波在选定窗宽内时间分段次序中是具有相似性的短时傅里叶变换的变换对;

所述当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的计算公式如下所示:

$$s_m = \frac{\left| \sqrt{\frac{\sum_{i=p}^{n+p} (A_i - \bar{A}_i)^2}{n-1}} - \sqrt{\frac{\sum_{j=q}^{n+q} (B_j - \bar{B}_j)^2}{n-1}} \right|}{\sqrt{\frac{\sum_{i=p}^{n+p} (A_i - \bar{A}_i)^2}{n-1}}};$$

其中, A_i 是台站A地震记录短时傅里叶频谱的第*i*个幅值, B_j 是台站B地震记录短时傅里叶频谱的第*j*个幅值, p 是台站A在选定窗宽内短时傅里叶频谱的序号, q 是台站B在选定窗宽内短时傅里叶频谱的序号, $p=q$, n 是选定窗宽内地震记录短时傅里叶频谱的幅值的总数目;

步骤4:确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度;

所述当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度的计算公式如下所示:

$$V = \frac{(f_B - f_A) \times u}{f_B \cos \angle B - f_A \cos \angle A};$$

其中, V 是当前具有相似性的时间分段的断层滑动速率, f_A 是当前具有相似性的时间分段内台站A接收到的波源发出的地震波频率, $\angle A$ 是当前具有相似性的时间分段内断层上的

波源与接收台站A连线与断层上的波源运动方向之间的夹角; f_B 是当前具有相似性的时间分段内台站B接收到的波源发出的同一地震波频率, $\angle B$ 是当前具有相似性的时间分段内断层上的波源与接收台站B连线与断层上的波源运动方向之间的夹角, u 为地震波传播速率;

步骤5:判断是否计算完成全部地震记录时间分段的断层滑动速度,若是,执行步骤6,否则进行下一时间分段的两台站地震波在选定窗宽内的相似性判断,返回步骤3;

步骤6:以断层滑动时间和短时傅里叶变换时间为约束,在相应的时间内随机排列计算得到的全部断层滑动速度,得到断层速度-时间曲线,计算断层滑动速度-时间曲线下包围的面积 S ,以及断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e ;

所述以断层滑动时间和短时傅里叶变换时间为约束,是指断层滑动速度对应的时间应限制在整个断层滑动时间内,短时傅里叶变换得到的断层滑动速度与短时傅里叶变换时间相对应;

步骤7:若断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e 大于相对误差的阈值,则返回步骤6,若断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e 小于等于相对误差的阈值,得到断层滑动速度-时间曲线,即断层滑动速度函数。

2.根据权利要求1所述的基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法,其特征在于,所述步骤1中地震断层的滑动位错 D 和滑动时间 T_f 的计算公式如下所示:

$$D = 1.56 \times 10^{-7} \times M_0^{1/3};$$

$$T_f = 2.03 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3};$$

其中, D 是断层的滑动位错, T_f 是断层的滑动时间, M_0 是地震矩。

3.根据权利要求1所述的基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法,其特征在于,所述计算断层位错于速度曲线下包围面积的相对误差 e 的计算公式如下所示:

$$e = \frac{D - S}{D} \times 100\% ;$$

其中, D 是断层的滑动位错, S 是断层速度-时间曲线下包围的面积。

一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法

技术领域

[0001] 本发明属于地震学、地震工程学技术领域,尤其涉及一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法。

背景技术

[0002] 目前计算理论地震图经常使用的断层滑动速度函数主要有Haskell函数、钟形函数、指数函数、三角形函数等,Hisada的理论研究认为滑动速度函数具有迅速上升,相对缓慢地下降的特点。以上这些滑动速度函数的共同特点都是理论研究结果,都没有得到实测资料证实。

[0003] 没有实测资料的原因是无法直接测定。如果用地面测得的资料反推地震断层地震时的滑动速度,需要知道地壳介质参数,而地球的不可入性阻碍了人类对地壳细节信息的掌握,欲得到较准确的地震时断层滑动速度,需另辟蹊径。

[0004] 2014年在《地球物理学进展》发表的“用多普勒效应计算汶川余震断层滑动速度函数”以及2016年在《地球物理学进展》发表的“断层滑动速度的研究”两篇文章中提出可以用多普勒效应可以计算地震时断层滑动速度。该方法仅仅需要地震台站的记录、位置、震源位置和地震波传播速度等信息,无需掌握地壳介质信息,是值得研究的方法。

[0005] 多普勒效应是当波源和接收器之间发生相对运动时,接收器接收到波的频率与波源发出频率不同的现象。日常生活中交通工具行驶速度的测定就是利用了多普勒效应。

[0006] 多普勒效应可以这样进一步说明,当波源向接收器运动时,接收器接收到的频率比实际的高;当波源远离接收器运动时,接收器接收到的频率比实际低。实际上波源发出的频率是一定的,根据接收器接到的频率和波源发出的频率就可以计算出波源运动速度。

[0007] 地震发生时,断层发出的某一频率地震波,由于断层的滑动使得接收到的地震波频率不同于实际发出的频率,根据多台站接收到的频率,可以计算出断层滑动速度。

[0008] 采用多普勒效应计算断层滑动速度,具体计算了某余震断层滑动速度,证实了用多普勒效应确定断层滑动速度的有效性。但对该方法的运用上存在四方面的问题,首先对震源发出的某一频段、被二个接收台站接收到的地震波,在两台站表现出的特征缺乏理论分析;其次是如何具体确定二个接收台站接收到的地震波是由同一频段地震波发出的;再次是如何减少反射波和折射波干扰的问题;最后对断层滑动速度时间定位的准确性需要提高。

发明内容

[0009] 针对现有技术存在的问题,本发明提供一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法。

[0010] 本发明的具体技术方案是:

[0011] 一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法,包括以下步骤:

[0012] 步骤1:获取两台站的地震断层的滑动位错和滑动时间;

[0013] 步骤2:在地震断层滑动时间内提取地震波,按时间分段进行短时傅里叶变换:在两台站的地震记录中,在断层滑动时间内选择时间窗提取地震波,并对全部断层滑动时间内的地震记录按时间顺序进行短时傅里叶变换,将两台站短时傅里叶变换结果成对按时间分段次序进行排列;

[0014] 步骤3:按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,确定时间分段上的两台站地震波在选定窗宽内的相似性,确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对;

[0015] 步骤4:确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度;

[0016] 所述当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度的计算公式如下所示:

$$[0017] \quad V = \frac{(f_B - f_A) \times u}{f_B \cos \angle B - f_A \cos \angle A};$$

[0018] 其中, V 是当前具有相似性的时间分段的断层滑动速率, f_A 是当前具有相似性的时间分段内台站A接收到的波源发出的地震波频率, $\angle A$ 是当前具有相似性的时间分段内断层上的波源与接收台站A连线与断层上的波源运动方向之间的夹角; f_B 是当前具有相似性的时间分段内台站B接收到的波源发出的同一地震波频率, $\angle B$ 是当前具有相似性的时间分段内断层上的波源与接收台站B连线与断层上的波源运动方向之间的夹角, u 为地震波传播速率;

[0019] 步骤5:判断是否计算完成全部地震记录时间分段的断层滑动速度,若是,执行步骤6,否则进行下一时间分段的两台站地震波在选定窗宽内的相似性判断,返回步骤3;

[0020] 步骤6:以断层滑动时间和短时傅里叶变换时间为约束,在相应的时间内随机排列计算得到的全部断层滑动速度,得到断层速度-时间曲线,计算断层滑动速度-时间曲线下包围的面积 S ,以及断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e ;

[0021] 步骤7:若断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e 大于相对误差的阈值,则返回步骤6,若断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e 小于等于相对误差的阈值,得到断层滑动速度-时间曲线,即断层滑动速度函数。

[0022] 所述步骤1中地震断层的滑动位错 D 和滑动时间 T_f 的计算公式如下所示:

$$[0023] \quad D = 1.56 \times 10^{-7} \times M_0^{1/3};$$

$$[0024] \quad T_f = 2.03 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3};$$

[0025] 其中, D 是断层的滑动位错, T_f 是断层的滑动时间, M_0 是地震矩。

[0026] 所述按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,确定时间分段上的两台站地震波在选定窗宽内的相似性,确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的具体过程如下:

[0027] 按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,固定在第一个台站的短时傅里叶变换频谱上;在第二个台站的短时傅里叶变换频谱上以同样的窗宽,同样的步长进行滑动,计算两台站地震在该时间分段上的记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m ,若当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的值小于等于

相似性阈值时,则当前时间分段上两台站接收到的地震波地震记录有相似性;若当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的值大于相似性阈值时,以同样的窗宽,同样的步长继续在第二个台站短时傅里叶变换频谱上滑动,计算两台站地震记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m ,直到在当前时间分段上第二个台站短时傅里叶变换频谱的全部滑动完成,若依然不具有相似性,选定下一时间分段的两台站的短时傅里叶变换的变换对,直至两台站地震记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m 的值小于等于相似性阈值,即确定当前两台站地震波在选定窗宽内时间分段次序中是具有相似性的短时傅里叶变换的变换对;

[0028] 所述当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的计算公式如下所示:

$$[0029] \quad s_m = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=p}^{n+p} (A_i - \bar{A}_i)^2}{n-1}} - \sqrt{\frac{\sum_{j=q}^{n+q} (B_j - \bar{B}_j)^2}{n-1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=p}^{n+p} (A_i - \bar{A}_i)^2}{n-1}}};$$

[0030] 其中, A_i 是台站A地震记录短时傅里叶频谱的第*i*个幅值, B_j 是台站B地震记录短时傅里叶频谱的第*j*个幅值, p 是台站A在选定窗宽内短时傅里叶频谱的序号, q 是台站B在选定窗宽内短时傅里叶频谱的序号, $p=q$, n 是选定窗宽内地震记录短时傅里叶频谱的幅值的总数目。

[0031] 所述以断层滑动时间和短时傅里叶变换时间为约束,是指断层滑动速度对应的时间应限制在整个断层滑动时间内,短时傅里叶变换得到的断层滑动速度与短时傅里叶变换时间相对应。

[0032] 所述计算断层位错于速度曲线下包围面积的相对误差 e 的计算公式如下所示:

$$[0033] \quad e = \frac{D-S}{D} \times 100\%;$$

[0034] 其中, D 是断层的滑动位错; S 是断层速度-时间曲线下包围的面积。

[0035] 本发明的有益效果:

[0036] 本发明提出一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法,该方法仅仅需要地震台站的记录、位置、震源位置和地震波传播速度等信息,无需掌握地壳介质信息,用该方法计算得到的地震断层的滑动速度具有突然上升,迅速下降的特点。这与以往使用的理想化的“三角函数”、“钟形函数”明显不同。并且对断层滑动时间内的地震波记录做短时傅里叶变换,基本上可消除反射波和折射波的影响,同时增强了滑动速度时间定位的准确性。该方法提出的用两台站地震在时间分段上的记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列确定两台站地震波在选定窗宽内时间分段次序中是否是具有相似性的短时傅里叶变换的变换对,即确定两台站所接收到的地震波是否由同一频段地震波发出的,提高了计算断层滑动速度的准确性。

附图说明

[0037] 图1本发明具体实施例中基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法的流程

图；

[0038] 图2为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在11HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0039] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在11HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0040] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在11HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0041] 图3为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在21HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0042] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在21HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0043] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在21HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0044] 图4为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在23HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0045] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在23HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0046] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在23HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0047] 图5为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在26HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0048] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在26HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0049] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在26HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0050] 图6为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在28HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0051] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在28HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0052] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在28HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0053] 图7为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在28.8HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0054] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在28.8HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0055] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在28.8HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0056] 图8为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在29HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0057] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在29HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0058] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在29HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0059] 图9为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在30HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0060] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在30HZ附近南北方向的傅里叶幅值

谱；

[0061] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在30HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0062] 图10为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在31HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0063] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在31HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0064] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在31HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0065] 图11为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在32HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0066] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在32HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0067] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在32HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0068] 图12为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在35HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0069] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在35HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0070] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在35HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0071] 图13为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在40HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0072] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在40HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0073] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在40HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0074] 图14为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在43HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0075] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在43HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0076] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在43HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0077] 图15为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在46HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0078] 图16为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在48HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0079] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在48HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0080] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在48HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0081] 图17为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在50HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0082] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在50HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0083] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在50HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；

[0084] 图18为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在55HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0085] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在55HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0086] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在55HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0087] 图19为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在58HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0088] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在58HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0089] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在58HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0090] 图20为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在59HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0091] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在59HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0092] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在59HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0093] 图21为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在63HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0094] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在63HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0095] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在63HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0096] 图22为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在65HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0097] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在65HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0098] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在65HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0099] 图23为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在68HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0100] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在68HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0101] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在68HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0102] 图24为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在73HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0103] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在73HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0104] (b) 为地震台站B记录到的某次大地震在73HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0105] 图25为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在76HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

[0106] 其中, (a) 为地震台站A记录到的某次大地震在76HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱;

- [0107] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在76HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0108] 图26为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在80HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0109] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在80HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0110] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在80HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0111] 图27为本发明具体实施例中地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在87HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0112] 其中，(a)为地震台站A记录到的某次大地震在87HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0113] (b)为地震台站B记录到的某次大地震在87HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱；
- [0114] 图28为本发明具体实施例中某次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化；
- [0115] 其中，(a)为0-5秒内某次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化；
- [0116] (b)为6-17秒内某次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化；
- [0117] (c)为18-40秒内某次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化；
- [0118] (d)为43-55秒内某次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化；
- [0119] 图29为本发明具体实施例中某次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化；
- [0120] 其中，(a)为0-5秒内某次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化；
- [0121] (b)为6-17秒内某次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化；
- [0122] (c)为18-40秒内某次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化；
- [0123] (d)为43-55秒内某次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化。

具体实施方式

[0124] 下面结合附图和实例对本发明做进一步说明。以下实施例用于说明本发明，但不用来限制本发明的范围。

[0125] 一种基于多普勒效应的地震断层滑动速度计算方法，如图1所示，具体方法如下所述。

[0126] 步骤1：获取得到两台站的地震断层的滑动位错和滑动时间；

[0127] 本实施方式中，由相关文献获取某境内发生Ms8.0地震，震中位于 31.0°N ， 103.4°E ，震源深度为15公里。在地震台站A (31.54°N ， 103.69°E) 和地震台站B (31.89°N ， 105.26°E) 均记录到了本次地震。

[0128] 地震破裂滑动持续了90S，主要位错发生在近60S的四个时间段内，地震过程中释放的标量地震矩为 $9.4 \times 10^{20}\text{Nm}$ 。

[0129] 步骤2：在地震断层滑动时间内提取地震波，按时间分段进行短时傅里叶变换：在两台站的地震记录中，在断层滑动时间内选择时间窗提取地震波，并对全部断层滑动时间内的地震记录按时间顺序进行短时傅里叶变换，将两台站短时傅里叶变换结果成对按时间分段次序进行排列；

[0130] 此处对断层滑动时间内取s波记录做短时傅里叶变换，选择时间窗为3S，基本上可消除反射波和折射波的影响，同时增强了滑动速度时间定位的准确性。详细信息和短时傅

里叶变换分段信息见表1。

[0131] 表1短时傅里叶变换分段信息

	滑动第一阶段	滑动第二阶段	滑动第三阶段	滑动第四阶段
滑动时间段/S	0-14	15-34	35-43	44-58
[0132] 最大位错/m	1.0	6.3	5.6	1.8
短时傅里叶变	0-5	15-24	35-39	44-48
换分段/S	6-14	25-34	40-43	49-58

[0133] 图2到图27为此次大地震s波到达至90S时间内地震台站A和地震台站B记录短时傅里叶变换谱。

[0134] 步骤3:按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,确定时间分段上的两台站地震波在选定窗宽内的相似性,确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对;

[0135] 在本实施方式中,按时间分段次序成对选定两台站的地震波的短时傅里叶变换,在频域内选定窗宽,固定在第一个台站的短时傅里叶变换频谱上;在第二个台站的短时傅里叶变换频谱上以同样的窗宽,同样的步长进行滑动,计算两台站地震在该时间分段上的记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m ,若当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的值小于等于相似性阈值时,则当前时间分段上两台站接收到的地震波地震记录有相似性;若当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的值大于相似性阈值时,以同样的窗宽,同样的步长继续在第二个台站短时傅里叶变换频谱上滑动,计算两台站地震记录短时傅里叶变换频谱的相似性序列 s_m ,直到在当前时间分段上第二个台站短时傅里叶变换频谱的全部滑动完成,若依然不具有相似性,选定下一时间分段的两台站的短时傅里叶变换的变换对,直至两台站地震记录短时傅里叶频谱的相似性序列 s_m 的值小于等于相似性阈值,即确定当前两台站地震波在选定窗宽内时间分段次序中是具有相似性的短时傅里叶变换的变换对;

[0136] 所述当前时间分段上两台站地震波的相似性序列 s_m 的计算公式如公式(1)所示:

$$s_m = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=p}^{n+p} (A_i - \bar{A}_i)^2}{n-1}} - \sqrt{\frac{\sum_{j=q}^{n+q} (B_j - \bar{B}_j)^2}{n-1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=p}^{n+p} (A_i - \bar{A}_i)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

[0138] 其中, A_i 是台站A地震记录短时傅里叶频谱的第*i*个幅值, B_j 是台站B地震记录短时傅里叶频谱的第*j*个幅值, p 是台站A在选定窗宽内短时傅里叶频谱的序号, q 是台站B在选定窗宽内短时傅里叶频谱的序号, $p=q$, n 是选定窗宽内地震记录短时傅里叶频谱的幅值的总数目。

[0139] 当序列 s_m 取最小值,且小于等于相似性阈值时,两台站接收到的地震记录有相似

性,即两台站的接收到的地震记录是由相同频段地震波发出的,其中,相似性阈值为8‰。

[0140] 步骤4:确定当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度;

[0141] 当前具有相似性的两台站的短时傅里叶变换的变换对的断层滑动速度的计算公式如式(2)所示:

$$[0142] \quad V = \frac{(f_B - f_A) \times u}{f_B \cos \angle B - f_A \cos \angle A} \quad (2)$$

[0143] 其中,V是当前具有相似性的时间分段的断层滑动速率, f_A 是当前具有相似性的时间分段内台站A接收到的波源发出的地震波频率, $\angle A$ 是当前具有相似性的时间分段内断层上的波源与接收台站A连线与断层上的波源运动方向之间的夹角; f_B 是当前具有相似性的时间分段内台站B接收到的波源发出的同一地震波频率, $\angle B$ 是当前具有相似性的时间分段内断层上的波源与接收台站B连线与断层上的波源运动方向之间的夹角,u为地震波传播速率。

[0144] 本实施例方式中,图2到图27为地震台站A和地震台站B具有相似性的傅里叶谱。

[0145] 图2为地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在11HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2),两者是同一波段的地震波发出的。根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-60.1m/s。

[0146] 下面的计算都得到公式(1)验证,故不赘述。

[0147] 图3为地震台站A和地震台站B记录到的某次大地震在21HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-143.6m/s。

[0148] 图4为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在23HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为0m/s。

[0149] 图5为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在26HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为0m/s。

[0150] 图6为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在28HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为1.3m/s。

[0151] 图7为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在28.8HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为2.7m/s。

[0152] 图8为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在29HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为0m/s。

[0153] 图9为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在30HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为0m/s。

[0154] 图10为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在30HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-7.9m/s。

[0155] 图11为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在32HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-0.01m/s。

[0156] 图12为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在35HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为13.8m/s。

[0157] 图13为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在40HZ附近南北方向的傅里

叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-1.2m/s。

[0158] 图14为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在40HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为2.3m/s。

[0159] 图15为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在46HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-16.7m/s。

[0160] 图16为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在48HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-10.9m/s。

[0161] 图17为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在50HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为30.4m/s。

[0162] 图18为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在55HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为2.7m/s。

[0163] 图19为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在58HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-148.0m/s。

[0164] 图20为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在59HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-4.4m/s。

[0165] 图21为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在63HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为113.2m/s。

[0166] 图22为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在65HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-15.9m/s。

[0167] 图23为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在68HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为189.4m/s。

[0168] 图24为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在73HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为16.4m/s。

[0169] 图25为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在76HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为106.1m/s。

[0170] 图26为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在80HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为87.4m/s。

[0171] 图27为地震台站A和地震台站B记录到的此次大地震在87HZ附近南北方向的傅里叶幅值谱,根据公式(2)计算得到对应的滑动速度为-92.3m/s。

[0172] 步骤5:判断是否计算完成全部地震记录时间分段的断层滑动速度,若是,执行步骤6,否则进行下一时间分段的两台站地震波在选定窗宽内的相似性判断,返回步骤3;

[0173] 步骤6:以断层滑动时间和短时傅里叶变换时间为约束,在相应的时间内随机排列计算得到的全部断层滑动速度,得到断层速度-时间曲线,计算断层滑动速度-时间曲线下包围的面积S,以及断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差e;其计算公式如式(3)所示:

$$[0174] \quad e = \frac{D-S}{D} \times 100\% \quad (3)$$

[0175] 其中,D是断层的滑动位错;S是断层速度-时间曲线下包围的面积。

[0176] 步骤7:若断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差e大于相对误差的阈

值,则返回步骤6,若断层位错与速度曲线下包围面积之间的相对误差 e 小于等于相对误差的阈值,得到断层滑动速度-时间曲线,即断层滑动速度函数,其中相对误差的阈值为5%。

[0177] 图28为此次地震断层沿向北方向滑动速度随时间的变化,其中,(a)为0-5秒内此次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化、(b)为6-17秒内此次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化、(c)为18-40秒内此次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化、(d)为43-55秒内此次地震断层向北方向滑动速度随时间的变化,其中滑动速度较小的时间段没有画出。滑动速度的显著特点是速度的突变,绝大多数时间滑动速度都不大,有些时间段断层没有滑动(如图4,5,8,9)。

[0178] 图29为此次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化,其中,(a)为0-5秒内此次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化、(b)为6-17秒内此次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化、(c)为18-40秒内此次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化、(d)为43-55秒内此次地震断层向南方向滑动速度随时间的变化,其中滑动速度较小的时间段没有画出。滑动速度的显著特点是速度的突变,绝大多数时间滑动速度都不大,有些时间段断层没有滑动。

[0179] 根据张勇等在2008年《中国科学D辑:地球科学》中发表的文章“某次大地震的时空破裂过程”的反演结果,此次地震发生后的0-14S内大约释放了全部地震矩的9%;15-34S内释放了全部地震矩的60%;34-43S内释放了全部地震矩的8%;43-58S内释放了全部地震矩的17%。我们计算结果在对应时间内都有一次滑动速度峰值出现,说明了计算结果的可靠性。

[0180] 此次地震断层沿东西方向的滑动速度与图28和图29的情况类似。限于篇幅,不再列出。

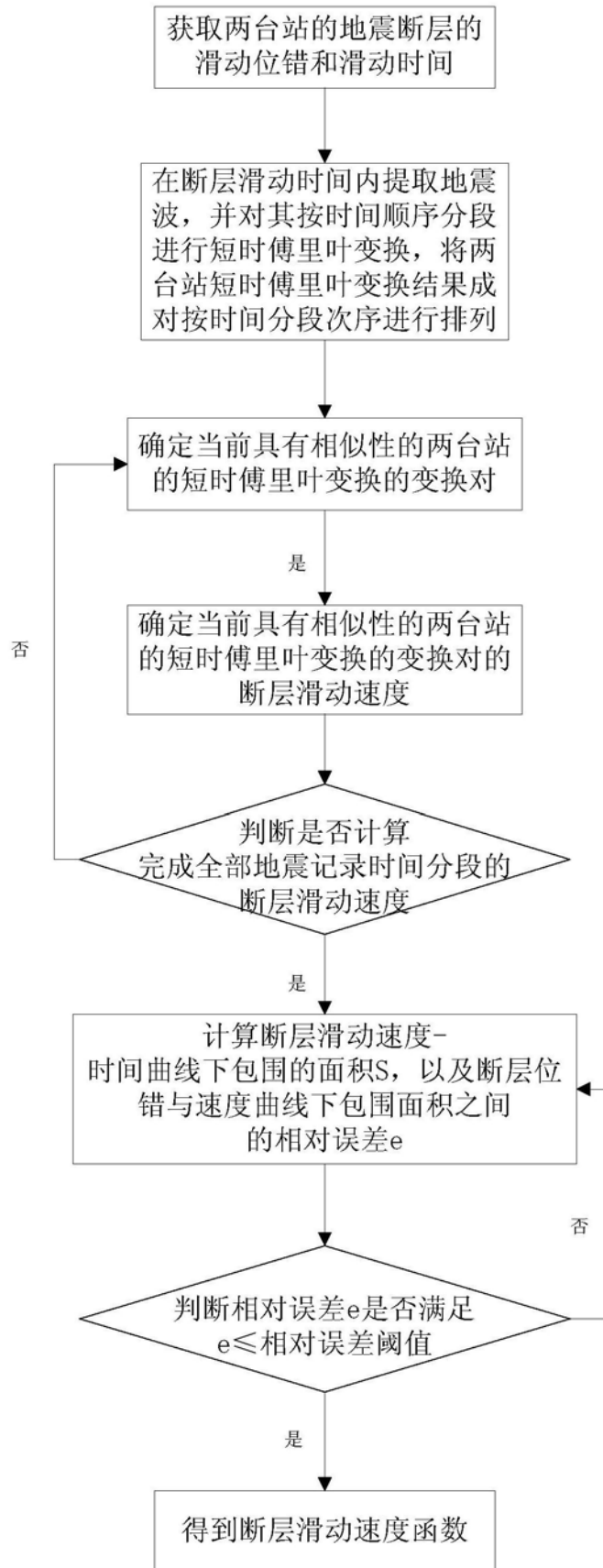


图1

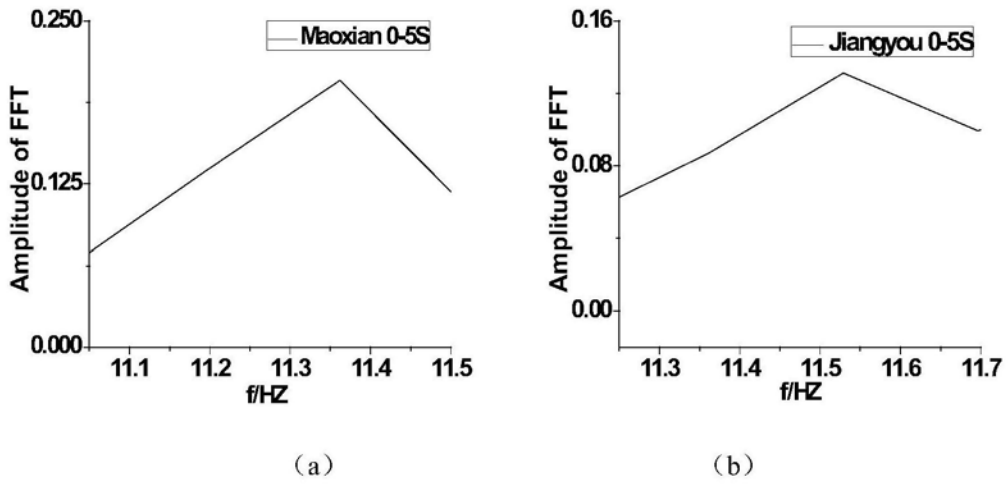


图2

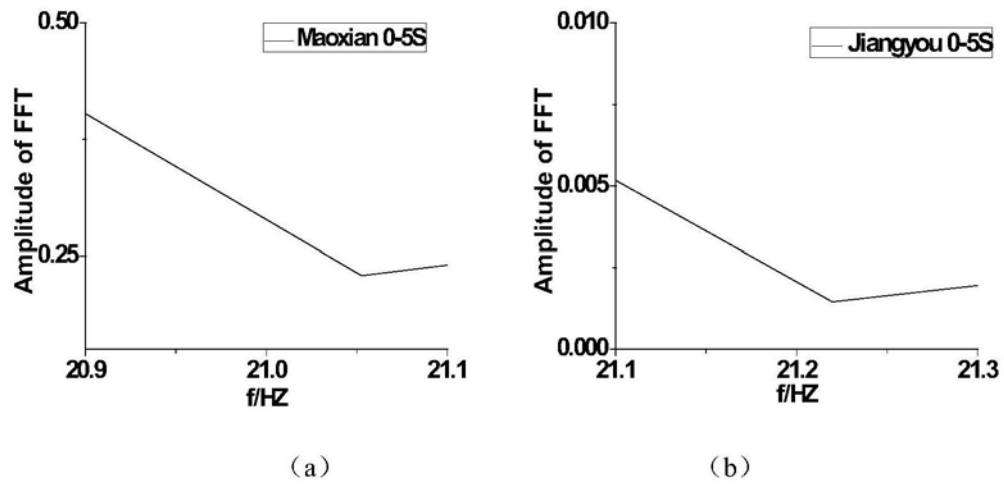


图3

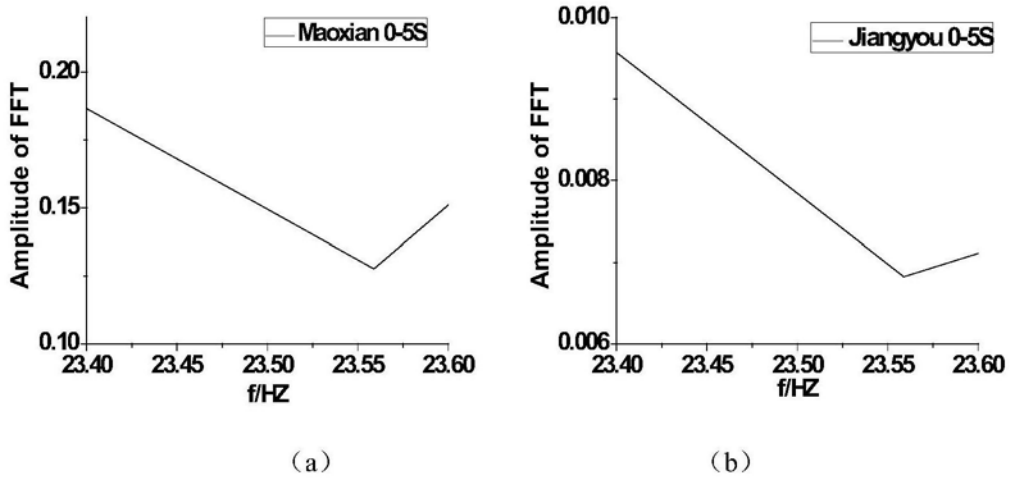


图4

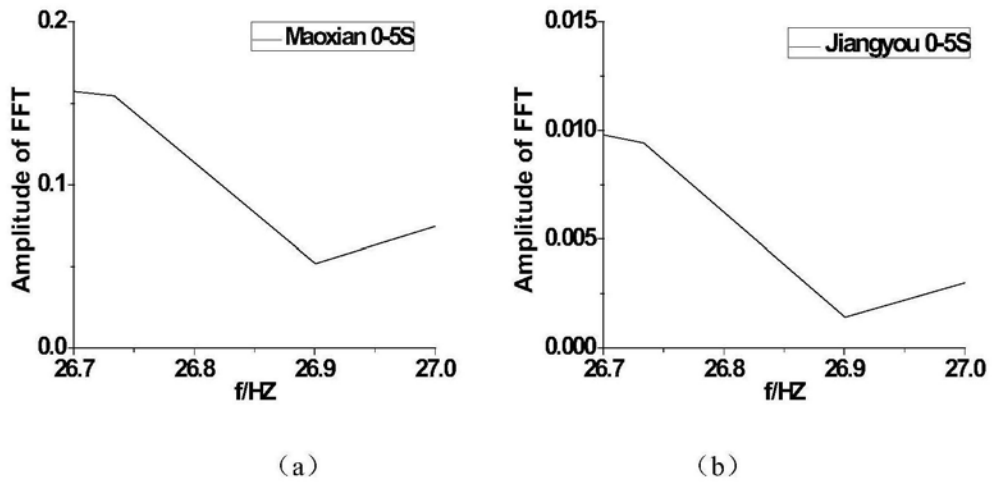


图5

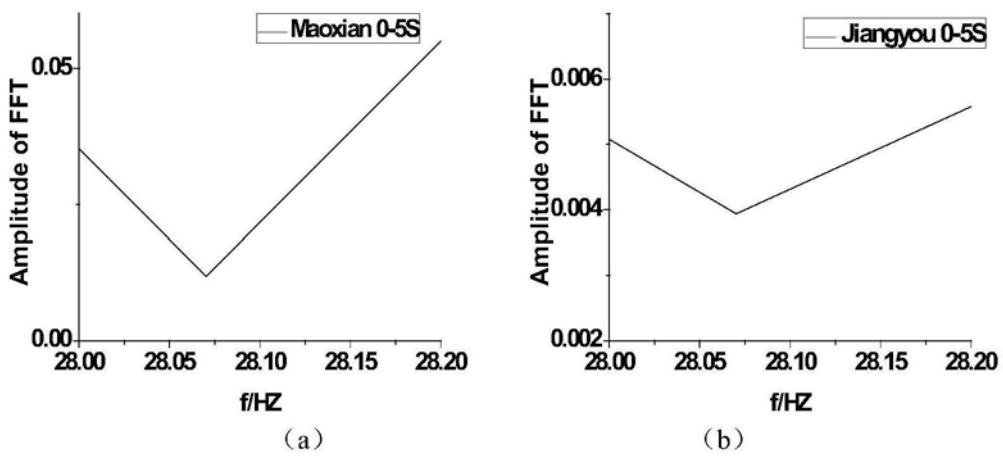


图6

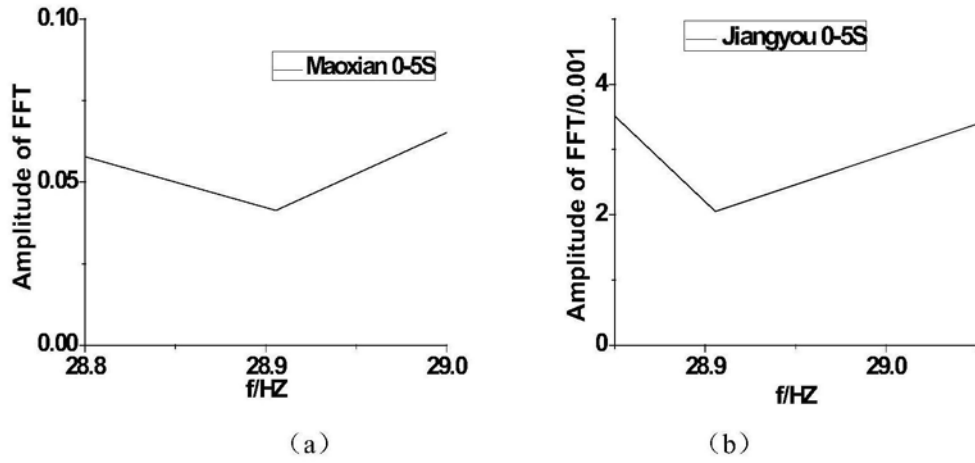


图7

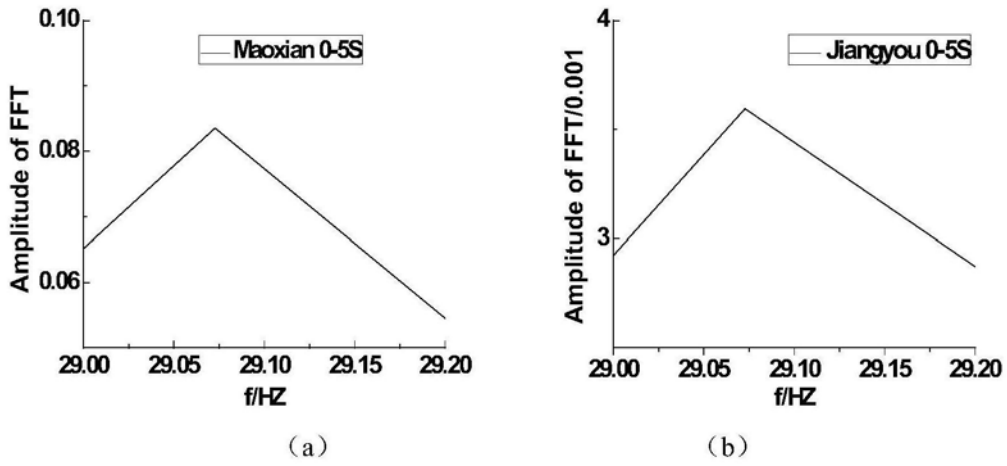


图8

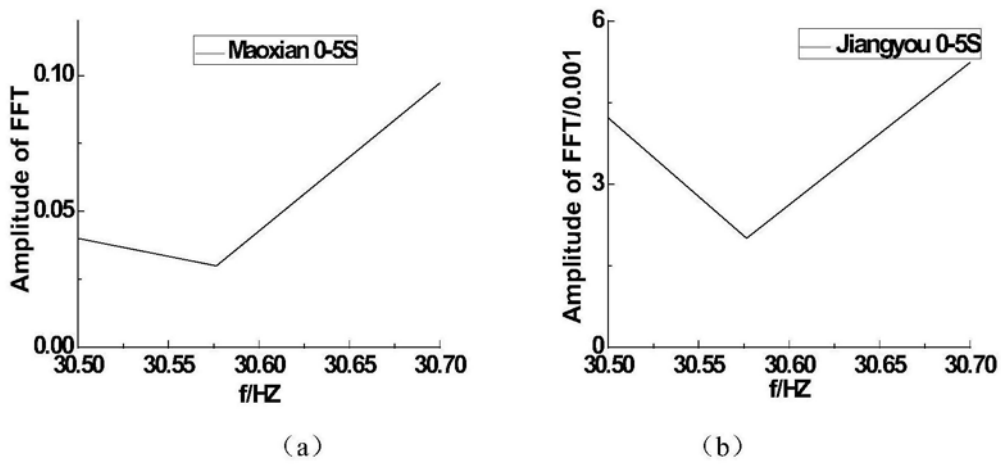


图9

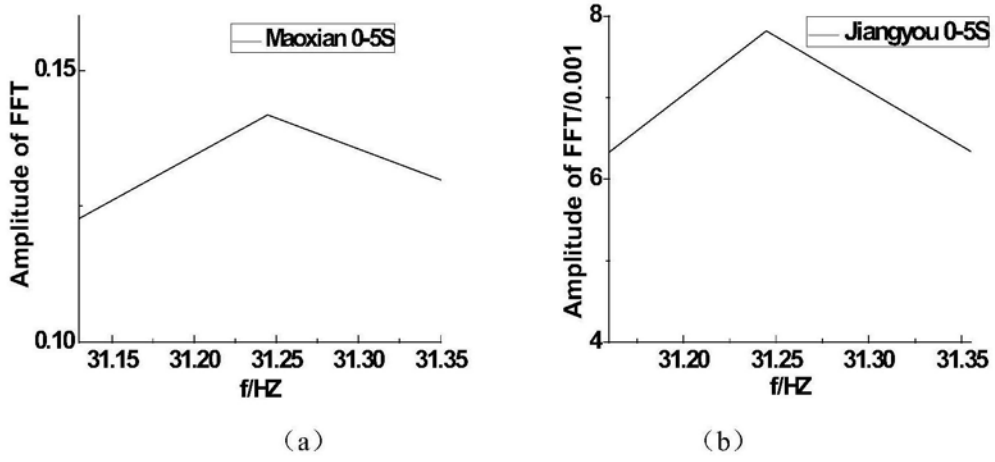


图10

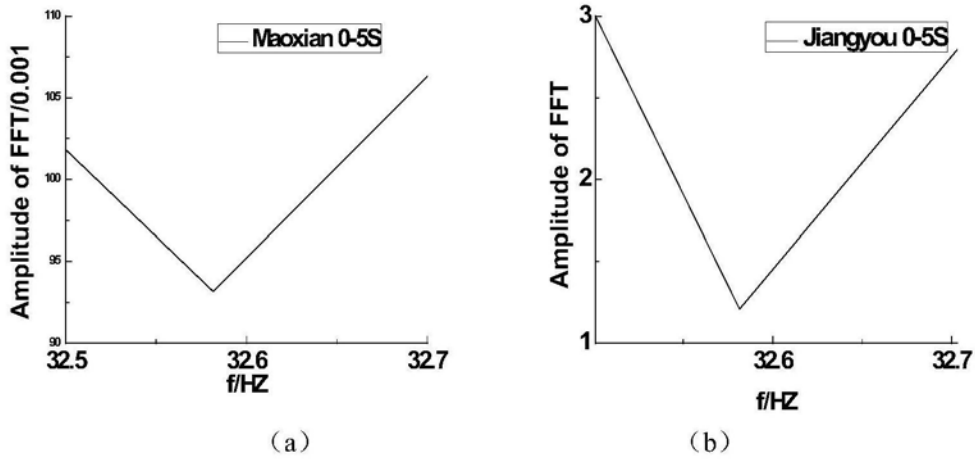


图11

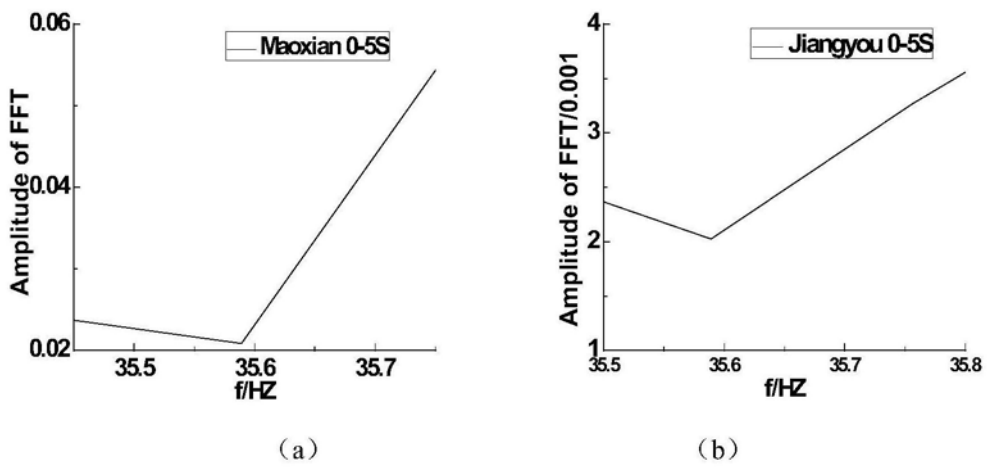


图12

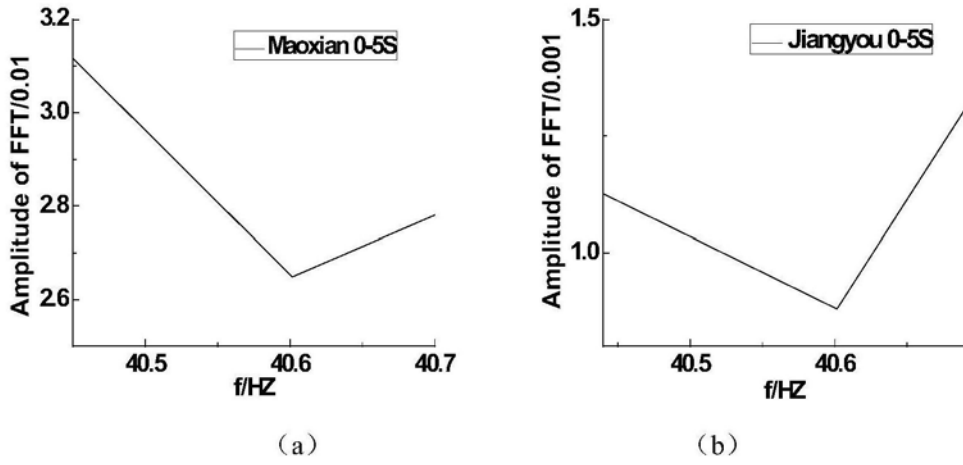


图13

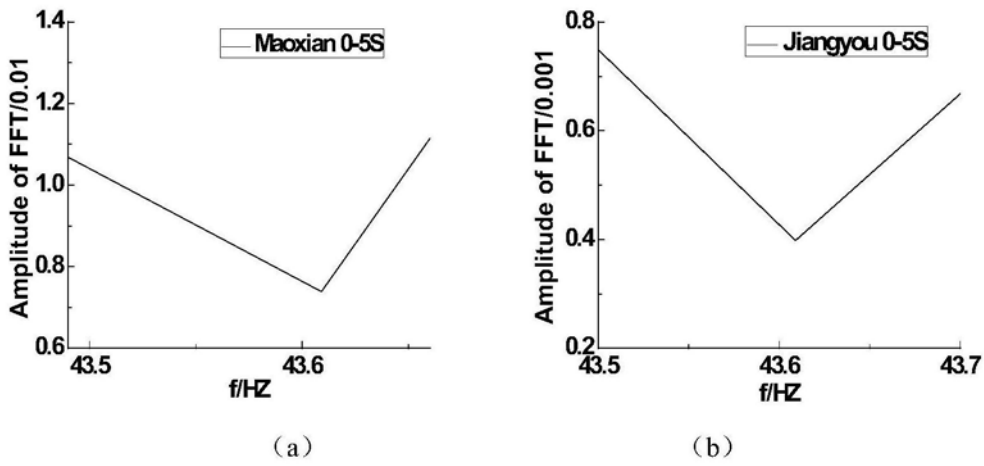


图14

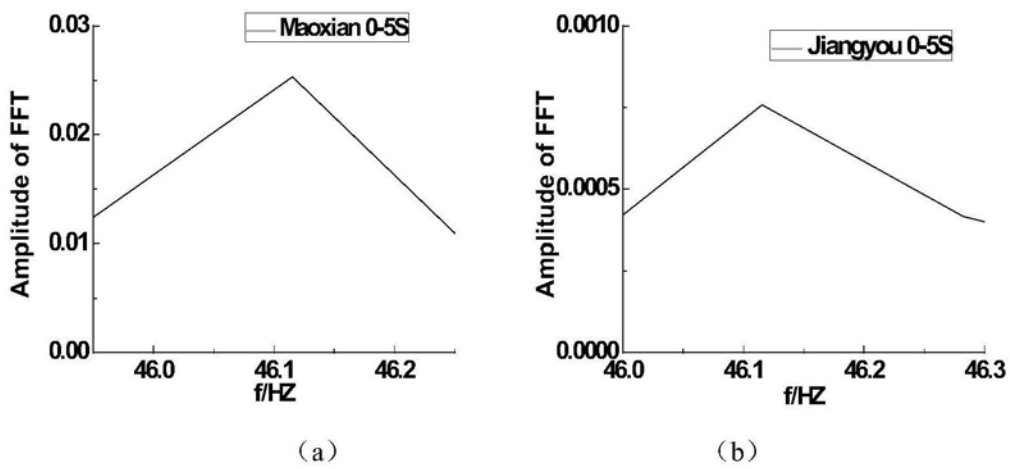


图15

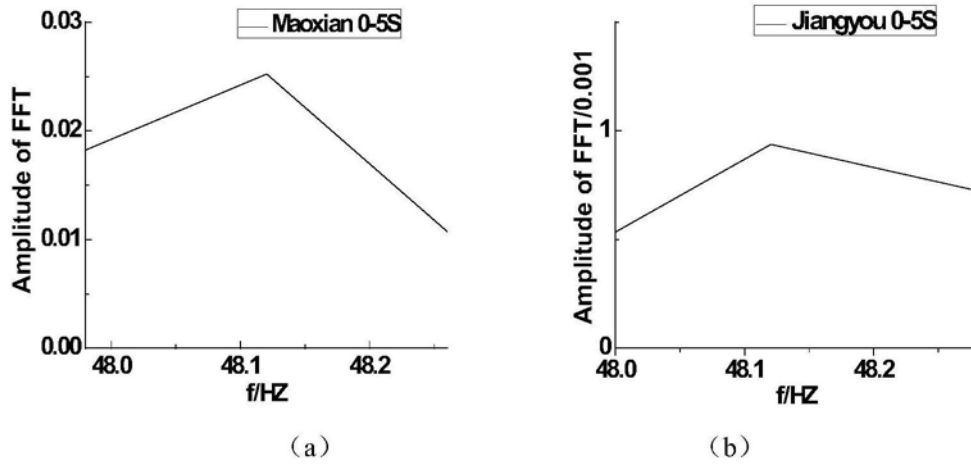


图16

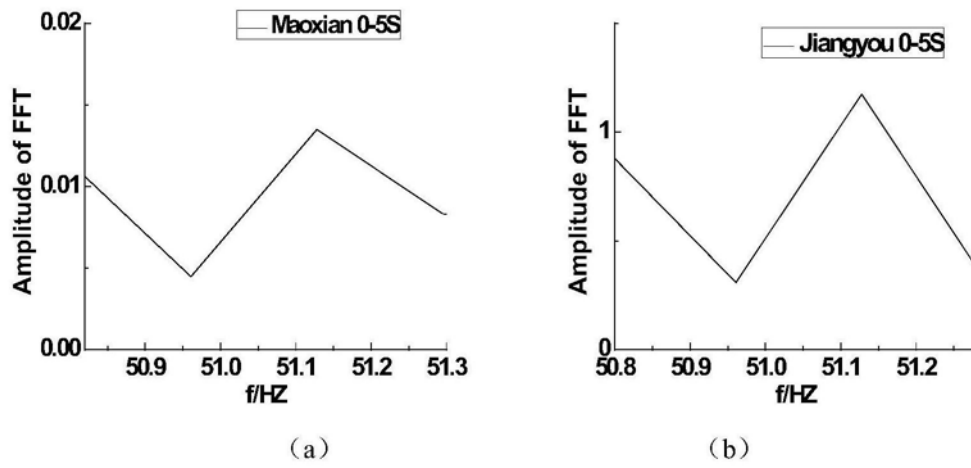


图17

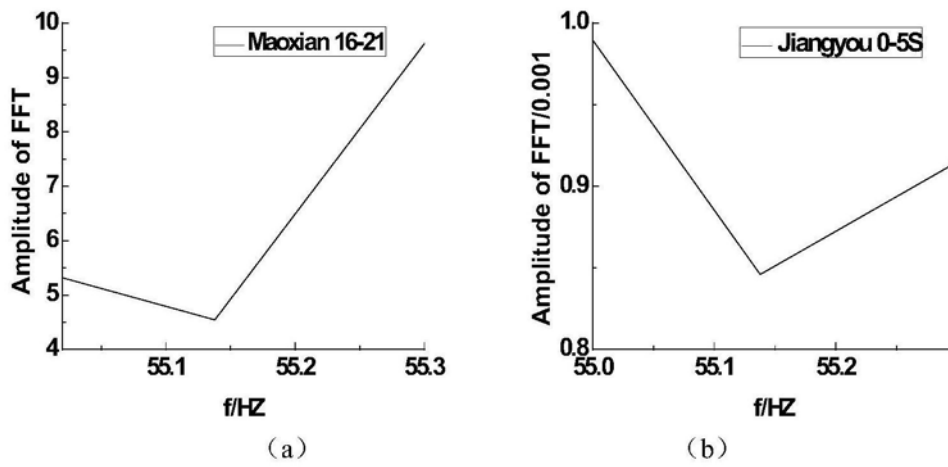


图18

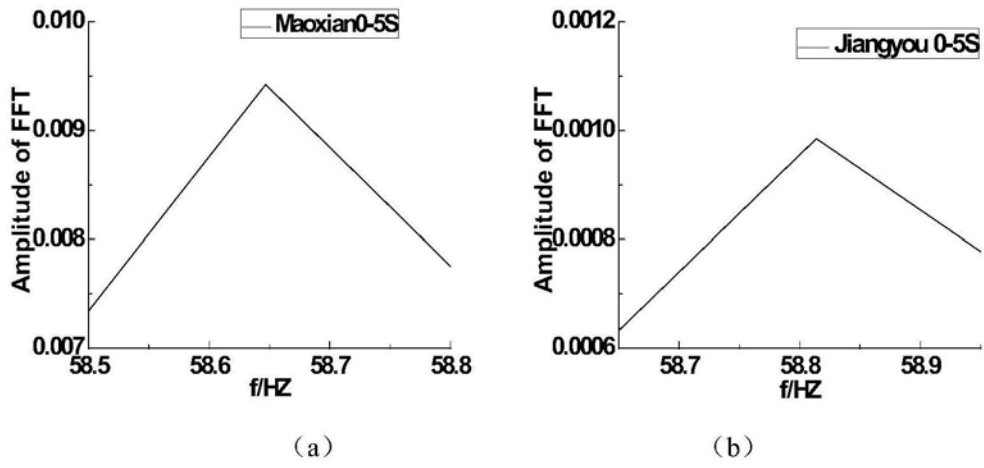


图19

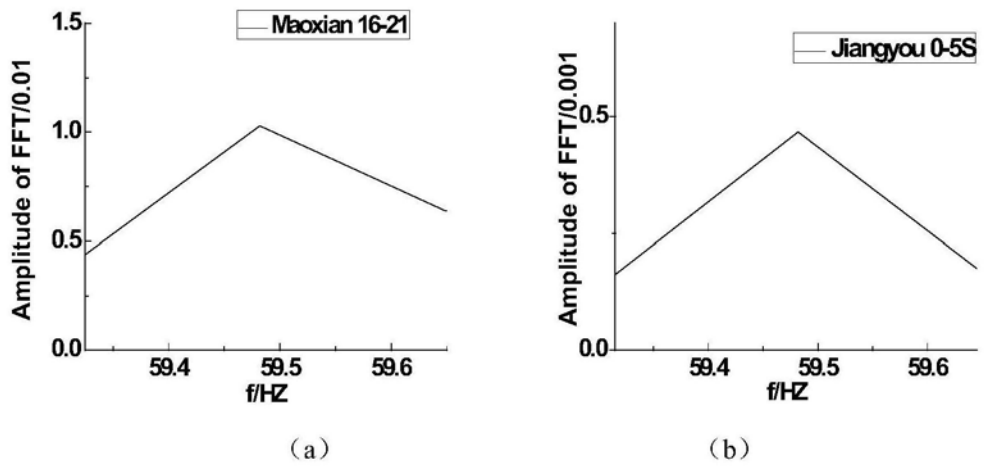


图20

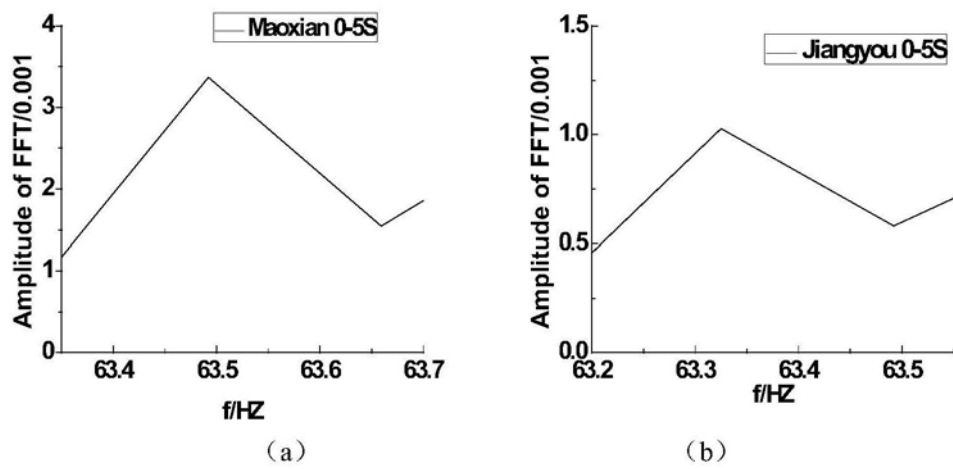


图21

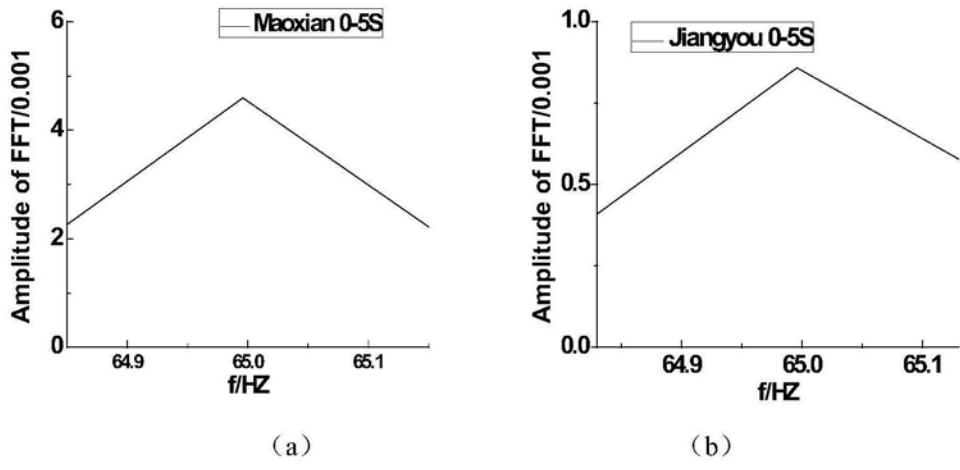


图22

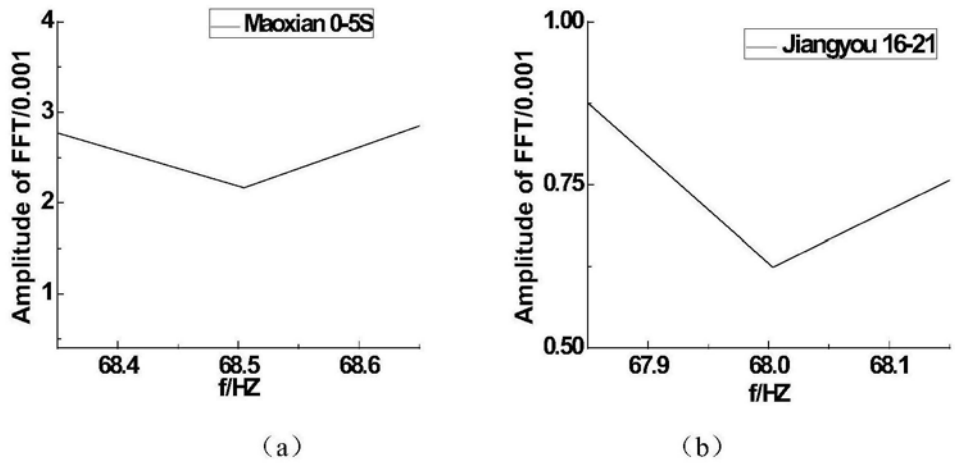


图23

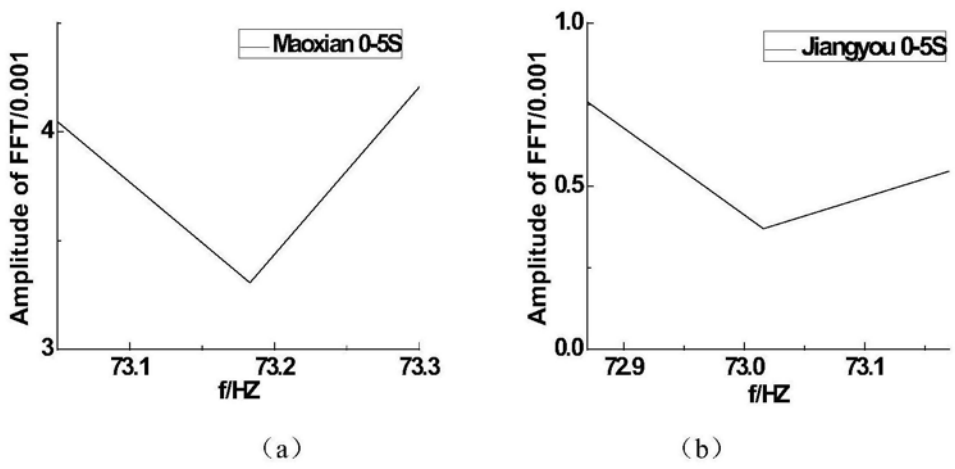


图24

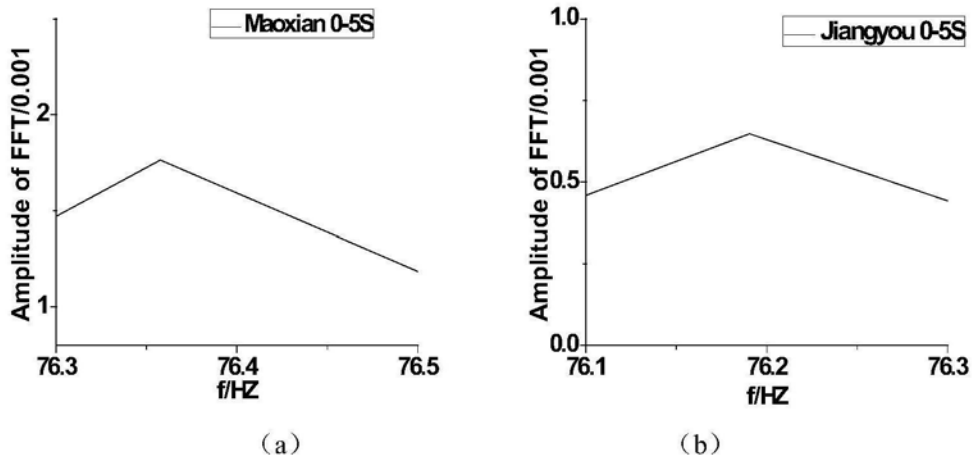


图25

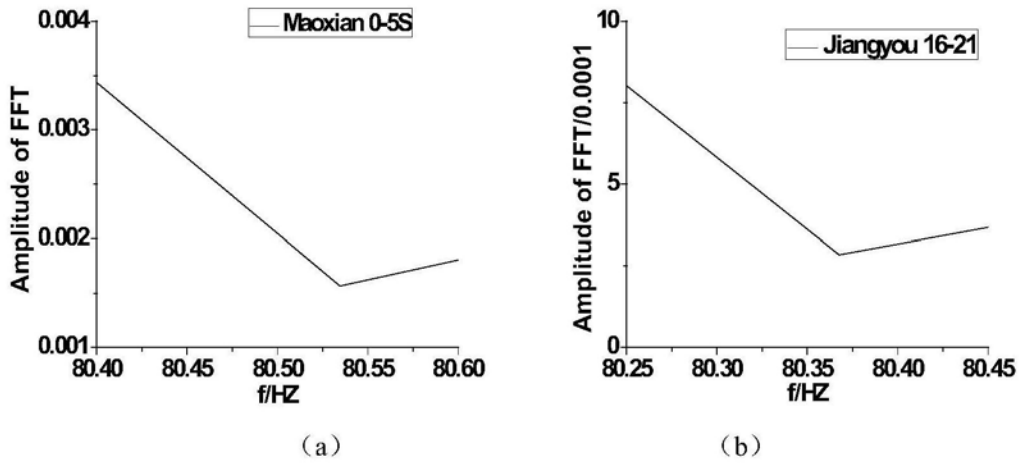


图26

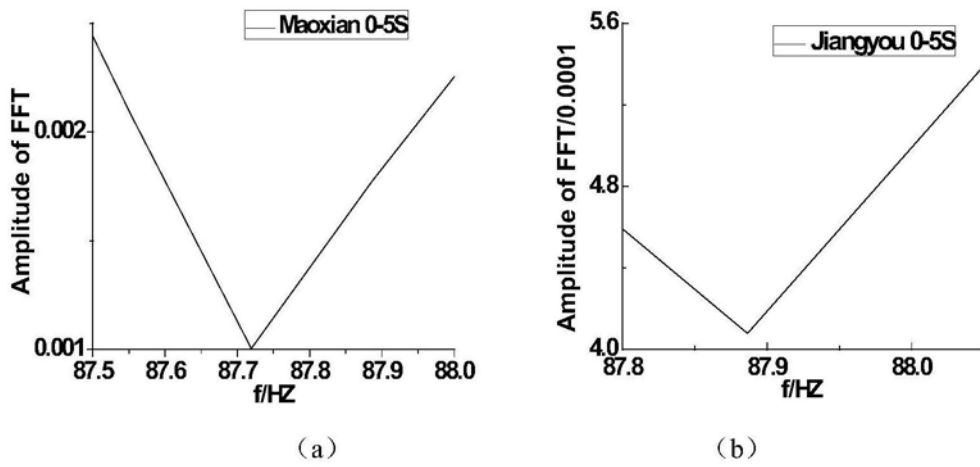


图27

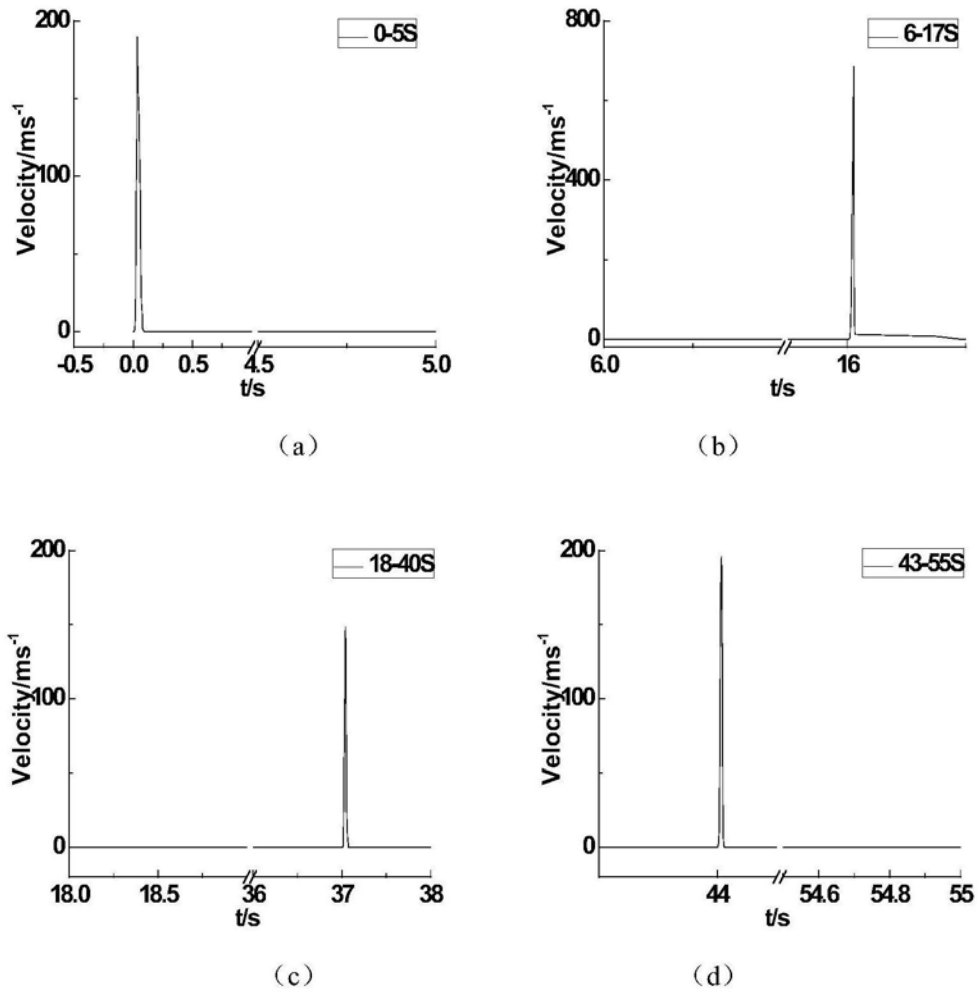


图28

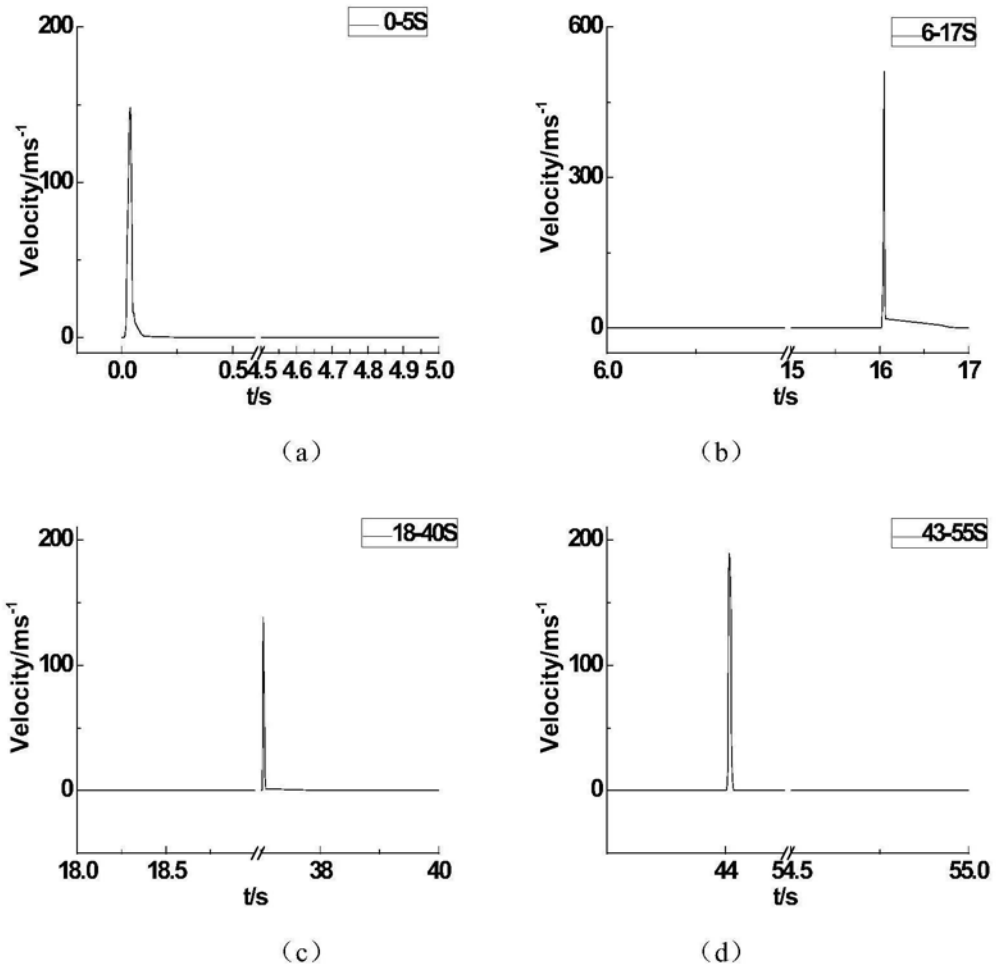


图29