

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314506

基于自适应极化滤波的地下浅层 P/S 波解耦方法^{*}

曾 媛^{1,2} 李 剑^{1,2} 马明星^{1,2} 贺 斌^{1,2} 刘 瑞^{1,2}

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051)

摘 要: 针对地下爆炸近场横纵波场混叠,造成 P 波震动场难以重建的问题,提出基于自适应极化滤波的横纵波分离解耦方法。首先,通过分数阶 Hilbert 变换获取波场中 P/S 波瞬时极化分布,提高混叠特征信息精细化分析的能力。其次,利用 ACM 提取出 P/S 波瞬时极化角度信息,并以极化度实现 P 波、P/S 波识别;再次,设计利用角度信息构建空间极化滤波器。最后,进行仿真验证并讨论分析不同调制因子和不同特性组合的分离解耦效果。通过实验仿真结果表明:本方法能够有效实现波场分离解耦,在方向性调制因子为 10 时,振幅性调制因子为 3 时,分离准确度达到 96.5%,分离解耦效果最佳。

关键词: 分数阶 Hilbert 变换;瞬时极化分析;空间极化滤波器;横纵波分离

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4040

Shallow subsurface P/S waves based on adaptive polarization filtering decoupling method

Zeng Yuan^{1,2} Li Jian^{1,2} Ma Mingxing^{1,2} He Bin^{1,2} Liu Rui^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem that the P-wave vibration field is difficult to reconstruct due to the aliasing of the near-field transverse and longitudinal wave field in underground explosion, a new method of transverse and longitudinal wave separation and decoupling based on adaptive polarization filtering is proposed in this paper. Firstly, the instantaneous polarization distribution of P/S wave in the wave field is obtained by fractional order Hilbert transform to improve the ability of fine analysis of feature information. Secondly, the instantaneous polarization Angle information of P/S wave is extracted by ACM, and P/S wave and P/S wave are recognized by polarization degree. Thirdly, the Angle information is used to construct the spatial polarization filter. Finally, the separation and decoupling effects of different modulation factors and different characteristic combinations are discussed and analyzed by simulation. The experimental simulation results show that the proposed method can effectively realize the separation and decoupling of wave field. When the directional modulation factor is 10 and the amplitude modulation factor is 3, the separation accuracy reaches 96.5%, and the separation and decoupling effect is the best.

Keywords: fractional order Hilbert transform; transient polarization analysis; spatial polarization filter; transverse and longitudinal wave separation

0 引 言

地下浅层能量场重建技术是利用震动传感器阵列获取的 P 波信号,以反演方式重建^[1]爆炸近场区域 P 波能量场分布特性。该技术是评估地下爆炸威力,评价结构易损性的关键^[2]。由于地下结构特性复杂,介质层间存在强反射效应,造成 P 波、S 波混叠严重,P 波震动场难以重建^[3]。

为了实现爆炸近场 P 波、S 波分离,提高 P 波震动场重建精度,目前主要借鉴深层地震勘探领域的波场分离方法。Flinn^[4]最早对检波器获取的地震信号在时域上提出将协方差矩阵应用于不同波型的分离,但是仅仅利用直线性和方向性进行信号分析,缺少对偏振信息的充分提取。刘建华等^[5]采用多窗谱分析和快速傅里叶变换相结合的频率域极化滤波分析,减小对窗的依赖获得稳定的滤波效果,但仅

收稿日期:2023-09-01

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62271453)资助

仅利用奇异值分解获得 P 波径向能量造成信号特征获取不完全。王志农^[6]利用 Hilbert-Huang 变换进行波形分析,调节极化滤波窗口实现自适应极化滤波,保证对低频信号的充分补偿,但是由于仅仅考虑到面波特点而忽略了体波特征信息。Kakhki 等^[7]运用稀疏 S 变换处理三分量信号利用快速高效算法恢复波形微弱部分的频谱路径,提高了特征提取能力。Mohammadigheymasi^[8]在时频域进行极化分析,根据特征参数设计适配波型的极化滤波器实现波场分离解耦,但是当外界环境恶劣时,P/S 波时频分析出现不同程度的杂糅,分离效果受到影响。Kakhki 等^[9]对信号进行时频分析同时将高分辨解纳入偏振分析方法里,提高三分量波场滤波效果,但需要进行滤波处理同时要求信号为远震信号。这些方法对 P 波和 S 波区分度明显的地震信号有效果,但是由于地下爆炸近场采集横纵波信号速度差异小,信号在时间和频率上重叠严重,上述方法难以充分区分出横纵波特征。

针对上述问题,本文充分利用 P 波、S 波极化特性的差异,利用分数阶希尔伯特(FHT)变换获取三维震动信号的瞬时极化信息,通过自适应协方差分析(ACM)提取瞬时极化角度信息,利用极化度的差异进行 P/S 波识别,最后构建空间极化滤波器,完成地下爆炸近场横纵波分离解耦。

1 P/S 波场解耦原理

波场解耦方法的总体框图如图 1 所示,方法主要分为三个部分,分别是获取 P/S 瞬时极化信息、提取 P/S 波瞬时角度信息、构建 P 波空间极化滤波器三部分。

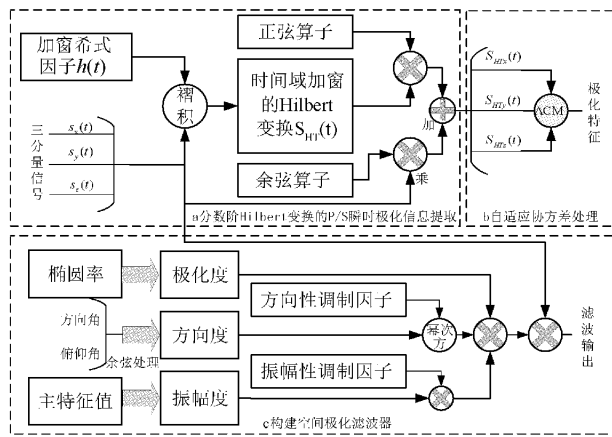


图 1 方法总体框图

1.1 基于分数阶 Hilbert 变换的 P/S 瞬时极化信息提取方法

针对地下浅层 P/S 波混叠严重,传感器获得信号太复杂,引入分数阶希尔伯特变换对信号进行特征提取,分数阶变换处理可以提取出信号内部更精细的特征。FHT 是在分数阶傅里叶变换的形式上设计的,其传递函数定义为^[10]:

$$H_{P,Q}(\omega) = F^{-Q}\{H_{P,Q}(\omega)F^Q\} \quad (1)$$

式中: F^Q 为分数阶傅里叶变换, Q 为分数阶傅里叶变换的阶数,并且:

$$H_P(\omega) = \cos\phi + i\sin\phi \operatorname{sgn}(\omega) \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\pi}{2}P, P \text{ 为分数阶希尔伯特变换的阶数。}$$

分数阶希尔伯特变换就是通过调整阶数来对滤波器进行控制从而进行信号有效特征提取,对于阶数数值的选取为分数阶希尔伯特变换的难点,本文通过结合 ACM 特征提取,来循环判定最佳阶数。

将实际信号进行分数阶希尔伯特变换处理,计算流程如图 1 里 a 部分,实信号 $s(t)$ 的一阶傅里叶变换定义为:

$$s_{HT}(t) = s(t) \times h(t) = H\{s(t)\} \quad (3)$$

式中: H 为算子; $h(t) = 1/\pi t$ 。式(3)在频率域的等价形式为:

$$S_{HT}^{\wedge}(U^{\otimes}) = \hat{S}(U^{\otimes}) \hat{h}(U^{\otimes}) \quad (4)$$

式中: $\hat{h}(U^{\otimes}) = -i \operatorname{sgn}(U^{\otimes})$ 。 k 次重复 H 运算,对 k 阶希尔伯特变换:

$$F\{H_k s(t)\} = F\{s(t)\} \cdot [-i \operatorname{sgn}(U^{\otimes})]^k \quad (5)$$

将式(5)中的 k 换成实数 $v \in (-\infty, \infty)$ 计算得到算子 $H_v = H^v$ 对应的传递函数^[11]为:

$$h_v^{\wedge}(U^{\otimes}) = \begin{cases} \exp(-iv\pi/2), & U^{\otimes} > 0 \\ [\exp(-iv\pi/2) + \exp(iv\pi/2)]/2, & U^{\otimes} = 0 \\ \exp(iv\pi/2), & U^{\otimes} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

引入余弦算子 $\cos(v\pi/2)$ 和正弦算子 $\sin(v\pi/2)$, 算子 H_v 可分解成如下形式:

$$H_v = \cos(v\pi/2) \cdot I + \sin(v\pi/2) \cdot H \quad v \in (-\infty, \infty) \quad (7)$$

式中: I 为恒等算子;实数 v 取正整数时,得到整数阶算子,相应的变换为:

$$H_v s(t) = s_v(t), \quad (8)$$

$$s_v(t) = \cos(v\pi/2)g_s(t) + \sin(v\pi/2)g_{s_{HT}}(t)$$

$s_v(t)$ 称为信号 $s(t)$ 的广义希尔伯特变换,其中 v 为阶数。

1.2 基于 ACM 的 P/S 瞬时角度信息提取方法

检波器采集的三分量信号 $u_i(t), (i = x, y, z)$ 经过分数阶希尔伯特变换,即信号经过式(8)处理将其变换为 $c_i(t)$ 。即解析信号^[12]表示为式(9):

$$c_i(t) = u_i(t) + ju_i^{\wedge}(t) \quad (9)$$

整体计算过程如图 1 的 b 部分,构建协方差矩阵 $\overline{M}(\xi)$, 协方差矩阵可以看出两个变量之间相互影响的大小,协方差矩阵适用于多维,对协方差矩阵进行特征值分解,衡量两个随机变量的相似程度,利用特征向量进行特征获取:

$$\bar{\mathbf{M}}(\xi) = \begin{pmatrix} \bar{I}_{xx}(t) & \bar{I}_{xy}(t) & \bar{I}_{xz}(t) \\ \bar{I}_{xy}(t) & \bar{I}_{yy}(t) & \bar{I}_{yz}(t) \\ \bar{I}_{xz}(t) & \bar{I}_{yz}(t) & \bar{I}_{zz}(t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$I_{km}(\xi) = \frac{1}{T_{km}(t)} \sum_{j=t_1}^{t_2} (u_k(j) - u_k(\xi))(u_m(j) - u_m(\xi)) \quad (11)$$

式(11)中的自适应时窗长度 $T_{km}(t)$ 利用式(12)求出:

$$T_{km}(t) = \frac{6\pi N}{\Omega_x(t) + \Omega_y(t) + \Omega_z(t)} = \frac{2\pi N}{\Omega_{av}^{km}(t)} \quad (12)$$

式中: N 为一个正整数, $\Omega_i(t)$ ($i = x, y, z$) 代表三分量对应的瞬时频率。取 $\bar{\mathbf{M}}(\xi)$ 的特征值为 λ_i ($i = 1, 2, 3$), 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, v_i 为 λ_i 对应特征向量, 最大特征值对应主特征向量 $v_1(v_{1x}, v_{1y}, v_{1z})$ 。由主特征向量^[18]可以得到以下瞬时极化角度参数:

$$\theta_0(t) = \arctan \left[\frac{v_{1y}(t)}{v_{1x}(t)} \right] \quad (13)$$

$$\delta_0(t) = \arctan \left[\frac{v_{1z}(t)}{\sqrt{v_{1x}^2(t) + v_{1y}^2(t)}} \right] \quad (14)$$

其中, $\theta_0(t)$ 为瞬时方位角, $\delta_0(t)$ 为瞬时倾角。

1.3 构建空间极化滤波器

利用极化分析获取的直线度、方向性可以涉及出传统的极化滤波器,但是存在分离效果差的问题本文在原来的基础上新增加振幅属性,将直线度、方向性和振幅度三个属性结合设计出空间极化滤波器,直线度是区分椭圆和线性粒子运动状态的关键参数,用式(15)表示为:

$$\text{Re}(\xi) = 1 - \frac{\lambda_2(\xi) + \lambda_3(\xi)}{\lambda_1(\xi)} \quad (15)$$

直线性滤波器可以设计为:

$$\psi_{\text{Re}}(\text{Re}(\psi)) = \begin{cases} 1, & -1 < \text{Re}(\xi) < \alpha \\ \cos\left(\frac{\pi(\text{Re}(\xi) - \alpha)}{2(\beta - \alpha)}\right), & \alpha < \text{Re}(\xi) < \beta \\ 0, & \beta < \text{Re}(\xi) < 1 \end{cases} \quad (16)$$

本文分离解耦的信号为横纵波信号,直线性接近于 1。方向性是根据粒子运动方向区分不同相位的另一个关键参数。方向性测度被定义为第一特征向量与基本向量的点积的绝对值:

$$D(\xi) = |v_1 e_i|, i \in \{x, y, z\} \quad (17)$$

相应地,方向性滤波器设置为:

$$\psi_D(D(\xi)) = \begin{cases} 1, & 0 < D(\xi) < \gamma \\ \cos\left(\frac{\pi(D(\xi) - \gamma)}{2(\lambda - \gamma)}\right) q, & \gamma < D(\xi) < \lambda \\ 0, & \lambda < D(\xi) < 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中,调节参数 λ 和 γ 有避免吉布斯现象的余弦锥化作用,在余弦函数上增加一个 q 方向性调制因子,由于偏振分析时方向性为 P/S 波分离的主要特征,方向性调节因子

起到关键作用,采用将方向性调节因子和余弦函数做幂次处理,增加调节因子对方向度的调整,通过改变调制因子来弥补特征提取时出现的角度偏差,进而提升分离解耦效果。

横纵波在振幅上是具有一定差异,而之前的研究方法完全关注方向性特征缺少对振幅特征的利用,振幅属性可以补偿解耦时幅度的丢失,分离出具有相同类型偏振方向的信号,振幅属性定义为:

$$A(\xi) = \sqrt{2}\lambda_1(\xi) \quad (19)$$

相应地,振幅性滤波器设置为:

$$\psi_A(A(\xi)) = \begin{cases} 0, & 0 < A(\xi) < s \\ p \cos\left(\frac{\pi(A(\xi) - s)}{2(\eta - s)}\right), & s < A(\xi) < \eta \\ 1, & \eta < A(\xi) < 1 \end{cases} \quad (20)$$

其中,调节参数 η 和 ξ 有避免吉布斯现象的余弦锥化作用,同时也增加 p 振幅性调制因子,由于振幅差异性小,信号分离取决于方向性,采用将振幅性因子和余弦函数相乘,来微调分离解耦结果在振幅上的差异,整体计算流程如图 1 的 c 部分。

通过组合直线性滤波器、方向性滤波器和幅度滤波器来获得用于分离解耦的滤波器:

$$\psi_R = 1 - \{1 - \Psi_{\text{Re}}\} \cdot \{1 - \Psi_D\} \cdot \{1 - \Psi_A\} \quad (21)$$

2 算法仿真验证

2.1 实验设计

地下波场三维仿真模拟如下:假设地下四层介质,层内介质均匀。建立 XZY 三维坐标系,震源点位置设置在模型中心,21 个检波器间距为 10 m 均匀排列设置在地表,具体位置结构如图 2 所示。

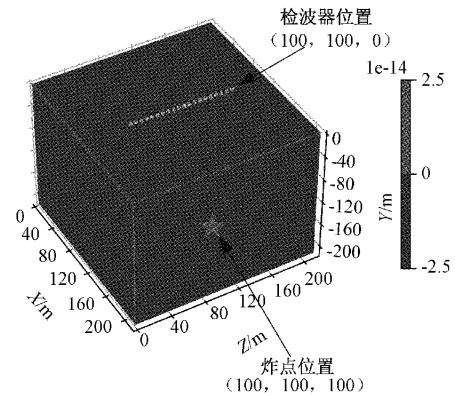


图 2 三维空间位置图

横纵波传播初始速度设置为 385 m/s 和 555 m/s,每上升 50 m 横纵波速度减少 50 m/s。激励方式采用雷克子波,信号采样率为 1 000 Hz,采样时间设置为 0.3 s,震动波的初至时刻为 0.05 s,频率为 160 Hz,衰减因子为 $e^{-i/160}$ ($i = 0, 1, \dots, n$),横波在 0.01 s 产生,频率为 80 Hz,衰减因子为 $e^{-i/160}$ ($i = 0, 1, \dots, n$)。具体采用有限差分法进行三维正演模拟过程如图 3 所示。

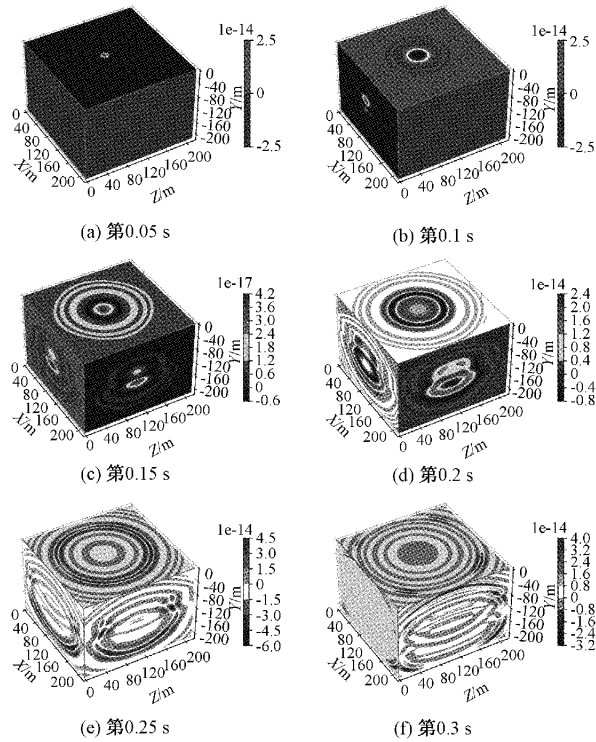


图 3 正演模拟过程图

2.2 提取 P/S 波场瞬时极化特性

获取地表布设的 21 个三分量检波器信号,对其进行道集整合,形成 XYZ 轴的道集整合图如图 4 所示,在道集整合图里得到 1~10 道信号混叠程度严重,10~21 道信号有明显的区别,抽取其中 XYZ 轴的第五道数据进行极化特征分析。

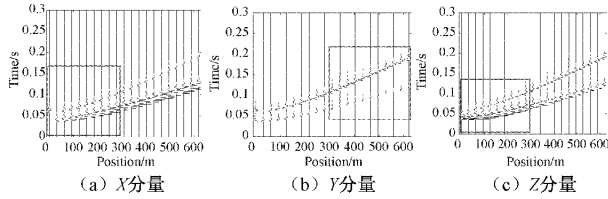
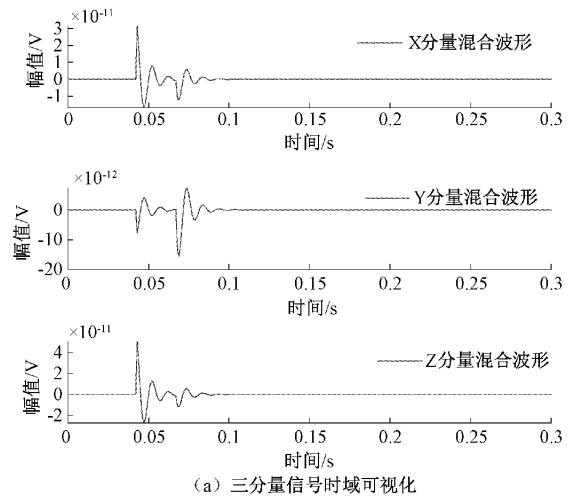


图 4 XYZ 轴道集整合图

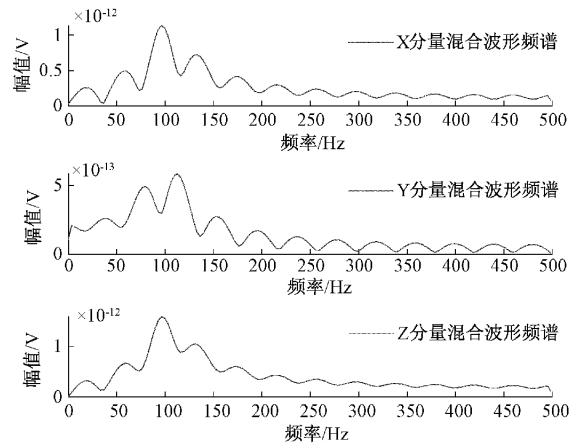
图 5(a)对第五道三分量数据时域波形进行可视化,同时图 5(b)对数据进行频谱分析,显示出信号的频率变化过程。信号混叠在 0.04~0.1 s 之间,三分量混叠信号频率集中在中心频率 100 Hz 附近空间震动显示出混叠信号呈线性,无椭圆形。

对第五道信号进行分数阶 Hilbert 变换加自适应极化滤波 ACM 分析,图 6 是信号采用分数阶希尔伯特变换后得到的方位角、倾角和椭圆率特征;图 7 分别是瞬时主极、中极和次极特征值,分数阶希尔伯特变换比标准协方差分析取得更平滑的特征,提升了特征的准确度,减少了噪声对特征的干扰。

根据得到的方向性特征、振幅特征以及直线度组合形



(a) 三分量信号时域可视化



(b) 三分量信号频域可视化

图 5 时域和频域信号可视化图

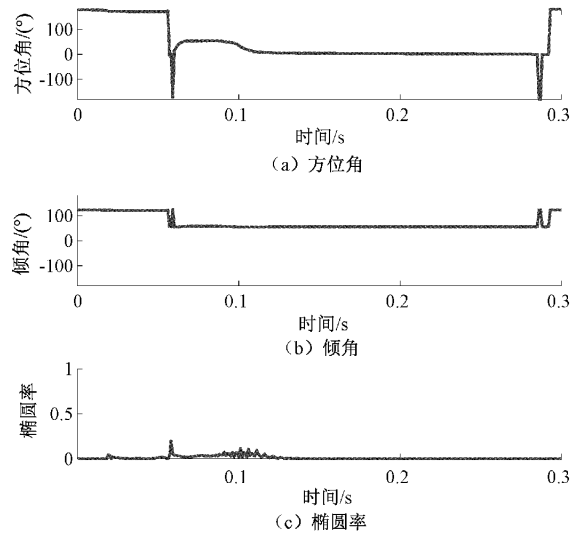


图 6 极化方向特征图

成合适的滤波器,由于图 6 中椭圆率几乎为 0,证明横纵波在地下传播趋于线性极化,直线度近似为 1。主特征值对应特征向量在 XYZ 轴上的投影可以确定信号的方向即方

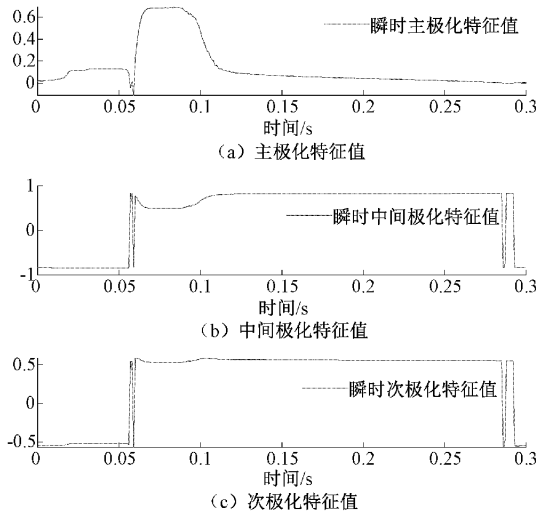


图 7 瞬时极化特征值

位角和俯仰角特征,使用瞬时主极化特征值代表振幅特性,结合不同的方向性调制因子以及振幅性调制因子将混叠信号分离解耦。

2.3 实现 P、S 波场分离

将信号输入滤波器中进行分离解耦,将分离信号、混合信号以及纯净信号进行三分量绘图,如图 8(a)、(b)所示:

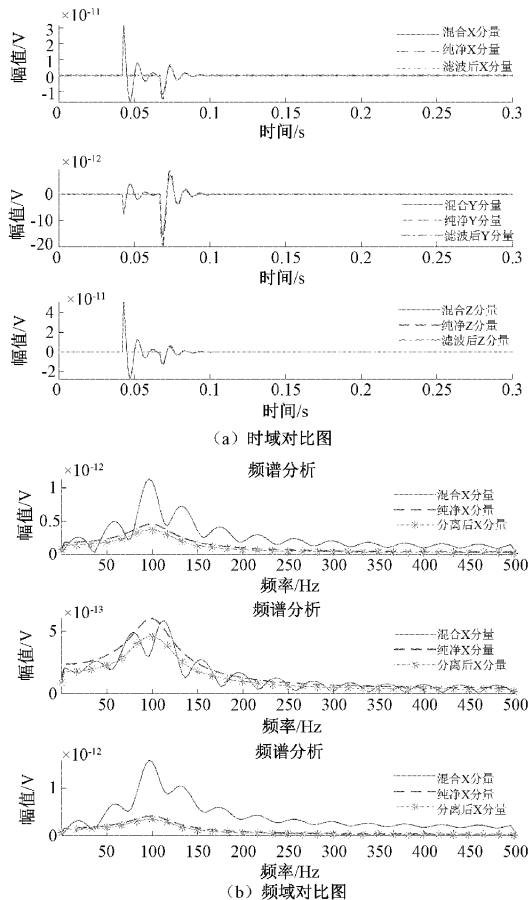


图 8 时域与频域对比图

分离信号和纯净信号在时域和频域上基本吻合,同时分离信号和混合信号完全分离解耦。

将分离信号、混合信号以及纯净信号进行时频分析后绘图,如图 9(a)所示:分离信号和混合信号在时频域完全分离解耦。图 9(b)所示分离信号和纯净信号在时频域上完全吻合。

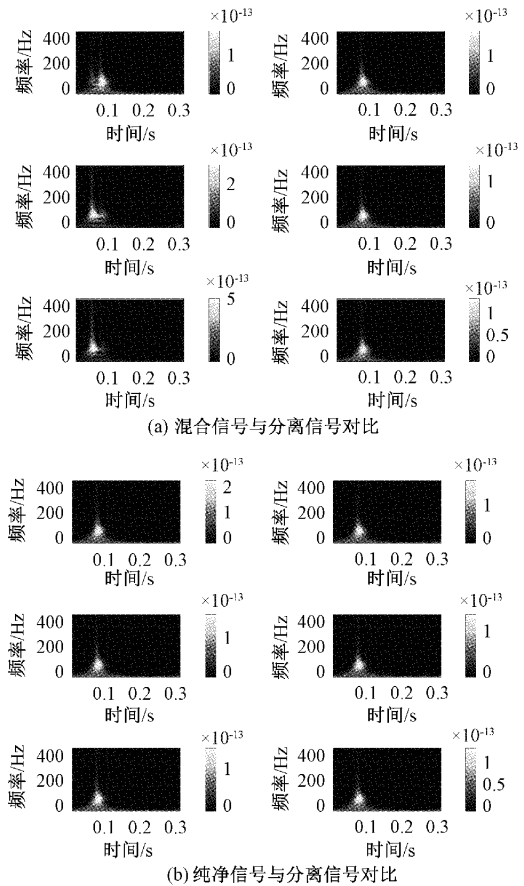


图 9 时频域分离效果对比图

2.4 分离解耦对比实验

将本文提出的分离解耦方法和当前领域最新方法进行对比实验,使用信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)和互相关归一化系数(NCC),进行分离效果评价,本文是在时频域上使用分数阶希尔伯特变换获取到极化特征,使用 ACM 分析获取角度特征,设计出空间极化滤波器完成分离解耦;将其和时域、频域和时频域极化分析方法^[14]进行对比,具体对比结果如表 1 所示。

表 1 不同方法对比结果

方法	SNR	RMSE	NCC
时域极化分析	20.15	0.172	0.956
频域极化分析	22.36	0.171	0.952
时频域极化分析	22.48	0.168	0.952
本文	24.12	0.170	0.971

从表中可以看出本文提出的方法在信噪比上高于之前的方法代表分离出 P/S 波信号干净;而均方根误差衡量观测值和真值之间的偏差,由于本文信号为地下浅层采集的信号,信号本身混叠严重,造成观测值和真值之间的偏差大;互相关归一化系数效果很好,这是由于本文在进行协方差处理之前,使用分数阶进行信号极化特征获取,摒弃掉浅层波场信号混叠严重带来的影响。

3 不同参数下空间极化滤波器解耦效果分析

根据主特征值对应特征向量设置极化滤波器,设定不同的方向性调制因子,以及不同的振幅性调制因子对比分离效果如图 10 和 11,使用广义 Jaccard 相似系数^[15]即分离准确度来判断分离效果,具体公式如下:

$$Jaccard(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i} \quad (22)$$

值越大代表信号越相似,即分离准确度越高。

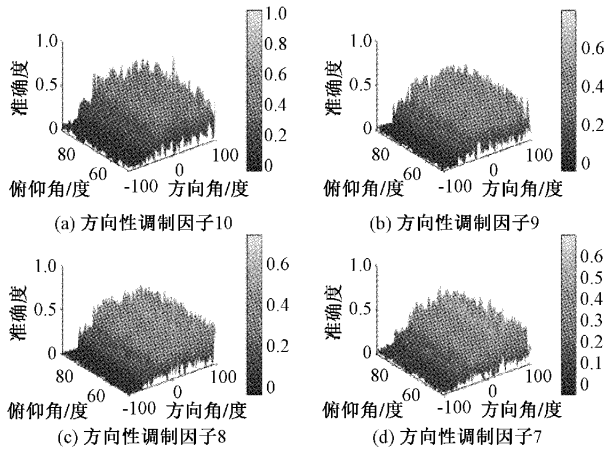


图 10 不同方向性调制因子对比图

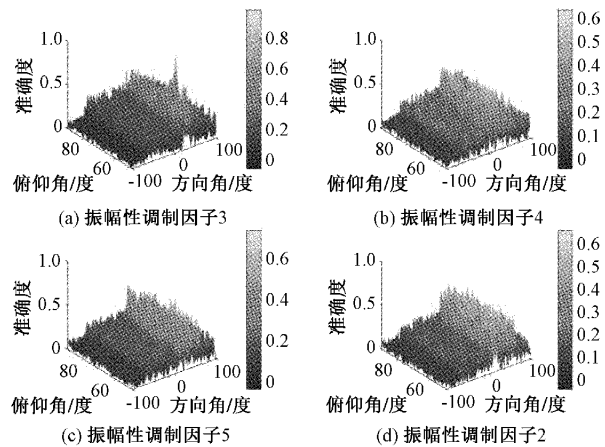


图 11 不同振幅性调制因子对比图

从图 10 和 11 中可以得到在俯仰角为 57°附近和方向角 32°附近时分离效果准确度到达最高接近于 1。在此基

础上调整方向性调制因子和振幅性因子,在图 8 中固定振幅性因子,在方向性因子为 10 时,分离效果最佳;在图 9 中固定方向性因子,在振幅性因子为 3 时,分离效果最佳;

设定滤波器参数为振幅性因子 3、方向性因子 10,使用 Jaccard 相似系数评价分离准确度为 96.45% 如图 12(a) 所示。将不同角度的信号进行滤波处理,如图 12(b) 所示不同角度信号滤波准确度图,从图中可以看出在俯仰角为 57°以及方向角为 32 的信号准确度达到最高为 96.5%,其他角度的信号解耦效果差,方向角为 360°,以 180°为对称轴分离效果呈现对称形式。

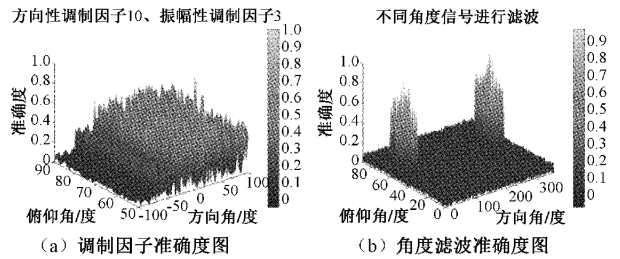


图 12 不同参数准确度图

4 结 论

本文提出了基于自适应极化滤波的波场分离解耦方法。首先将信号进行分数阶 Hilbert 变换处理获得信号精细特征。其次利用 ACM 进行极化特征分析,提取出三分量信号的主极化特征向量以及方向角和俯仰角。最后,调整方向性和振幅性调制因子,设计出最佳滤波器。数值仿真结果表明,上述方法能够对地下波场进行有效的分离解耦,为地下波场分离解耦提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 王良全,孔德仁. 地形环境对冲击波传播规律影响研究综述[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(5): 68-75.
- [2] 闫昕蕾,李剑,孔慧华等. 基于压缩感知的冲击波超压场重建方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 84-90.
- [3] 卢强,丁洋,刘赞哲,等. 黏弹性固体中地下爆炸辐射地震波能量的演化[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(9): 54-62.
- [4] FLINN E A. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion [J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(12): 1874-1876.
- [5] 刘建华,刘福田,胥頔. 三分量地震资料的偏振分析[J]. 地球物理学进展, 2006(1): 6-10.
- [6] 王志农,孙成禹,伍敦仕,闫月锋. 利用区域自适应极化滤波压制多分量面波干扰[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(6): 1206-1216, 1172.
- [7] KAKHKI M K, MOKHTARI A, MANSUR W J. Three-Component Sparse S Transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-7.

- [8] MOHAMMADIGHEYMASI H, CROCKER P, FATHI M, et al. Sparsity-Promoting Approach to Polarization Analysis of Seismic Signals in the Time-Frequency Domain [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-11.
- [9] KAKHKI M K, MOKHTARI A, MANSUR W J, et al. Three-Component high-resolution seismic time-frequency polarization filter [J]. Geophysical Journal International, 2023:407.
- [10] 李真真,杜明辉,吴效明. 基于分数阶希尔伯特变换的罗音特征提取[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011,39(12):38-43.
- [11] 宋洪勇,别立珍. 分数阶希尔伯特变换在提高纵向分辨率中的应用[J]. 华北地震科学,2013,31(4):13-21,54.
- [12] 马见青,李庆春,王美丁. 多分量地震极化分析评述[J]. 地球物理学进展,2011,26(3):992-1003.
- [13] 陈海峰,李向阳,钱忠平,等. 一种稳健压制陆上三分量地震记录中面波的自适应极化分析方法(英文)[J]. Applied Geophysics,2013,10(3):295-304,358.
- [14] 马见青,李庆春,王卫东,等. 多分量地震的时频域瞬时极化分析和滤波[J]. 地球物理学进展,2015,30(6):2723-2729.
- [15] 时天昊,白银山,沈堤,等. 一种基于广义 Jaccard 系数的改进 SAMP 压缩信号快速恢复算法[J]. 空军工程大学学报,2023,24(2):91-97.

作者简介

曾援,硕士研究生,主要研究方向为信号处理、语音分离等。

E-mail:2377816505@qq.com

李剑(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为传感器阵列信号获取、矩阵计算等。

E-mail:lijian@nuc.edu.cn