

杨佳佳, 徐华宁, 刘鸿, 等. 基于数据驱动边界效应抑制带通滤波方法[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(6): 103-106.

YANG Jiajia, XU Huaning, LIU Hong, et al. A data-driven approach to boundary effect suppression in band-pass filtering[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(6): 103-106.

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2025.123

基于数据驱动边界效应抑制带通滤波方法

杨佳佳^{1,2}, 徐华宁^{1,2*}, 刘鸿^{1,2}, 颜中辉^{1,2}, 杨睿^{1,2}, 王小杰^{1,2}, 刘欣欣^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 2 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

0 引言

受采集环境的影响, 海洋地震数据往往存在严重的低频背景噪声, 主要由涌浪造成, 其特点是频率低、振幅大, 表现为覆盖整个记录的背景噪音。常规的处理方法为 3~4 Hz 的低截滤波, 而实际处理过程中, 由于边界效应的存在, 带通滤波算子通常达不到理想的精度。在地震数据带通滤波实践中可知, 3~4 Hz 的低截滤波对边界影响较大, 50 Hz 以上的带通滤波对边界影响较小, 通常可以忽略。水深越浅, 浅部影响越明显, 一般当水深 > 500 ms 后可不考虑浅部影响; 而深部的影响则是无法避免的, 当靠近数据记录的底边界位置存在有效反射层位时, 必须考虑其影响。滤波边界效应消除的意义体现为 3 点: ①工程中可能遇到浅水地震数据, 改善海底成像; ②最大限度的保证深部地震反射信号的可利用度; ③防止偏移成像中因滤波造成数据污染使成像质量下降。

目前, 针对 3~4 Hz 低频噪音的压制方法主要采用常规的带通滤波算法, 这种算法对水深较大、记录时间较长的海洋地震数据影响可以忽略。同时, 基于无线脉冲响应(infinite impulse response, IIR)滤波器的滤波方法采用更加复杂的边缘处理算法, 在彻底压制噪声的同时可防止假频的产生。但是上述方法仍然存在一定的缺陷: IIR 滤波器的设计

需要解决一个多参数多目标优化问题, 不管是进行局部优化还是全局优化, 均需要复杂的计算将滤波指标转换为设计的滤波器参数, 而常规带通滤波算法仅需要滤波频率及经验斜坡即可得到滤波器算子, 所以, IIR 算法效率大大低于常规带通滤波算法。

本文为解决常规带通滤波算法存在的边界问题, 提出一种基于数据驱动边界效应抑制带通滤波方法, 对地震数据进行延拓和镶边运算, 然后, 通过对镶边后的数据进行带通滤波得到带边界截断效应的滤波结果, 解决常规带通滤波算法存在的边界问题。

1 处理方法

1.1 方法原理

受信号截断与有限数据长度的影响, 带通滤波会产生边界效应, 该效应受带通滤波器的通带与阻带之间的过渡带影响, 边界处的频谱分量会因数据截断而产生泄漏(如吉布斯现象), 导致滤波后的信号在边界处出现振荡或幅值偏差。

基于数据驱动边界效应滤波方法流程如图 1 所示, 在增加少量褶积计算量的基础上, 解决常规带通滤波算法存在的边界问题, 实现过程简单, 适用于绝大多数地震反射数据, 且其计算效率高于 IIR 算法。

1.2 实现步骤

1.2.1 原始数据时间域镶边

首先, 将原始数据延长 2N 个采样点, 再将原始数据向下移动 N 个采样点, 即在原始数据的上下各

收稿日期: 2025-06-11

资助项目: 国家自然科学基金(42106207)

第一作者: 杨佳佳(1987—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地震资料处理和多波多分量方面的研究工作. E-mail: yangjj0714@sina.com

* 通讯作者: 徐华宁(1973—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋地球物理调查方面的研究工作. E-mail: xuhuaning1973@163.com

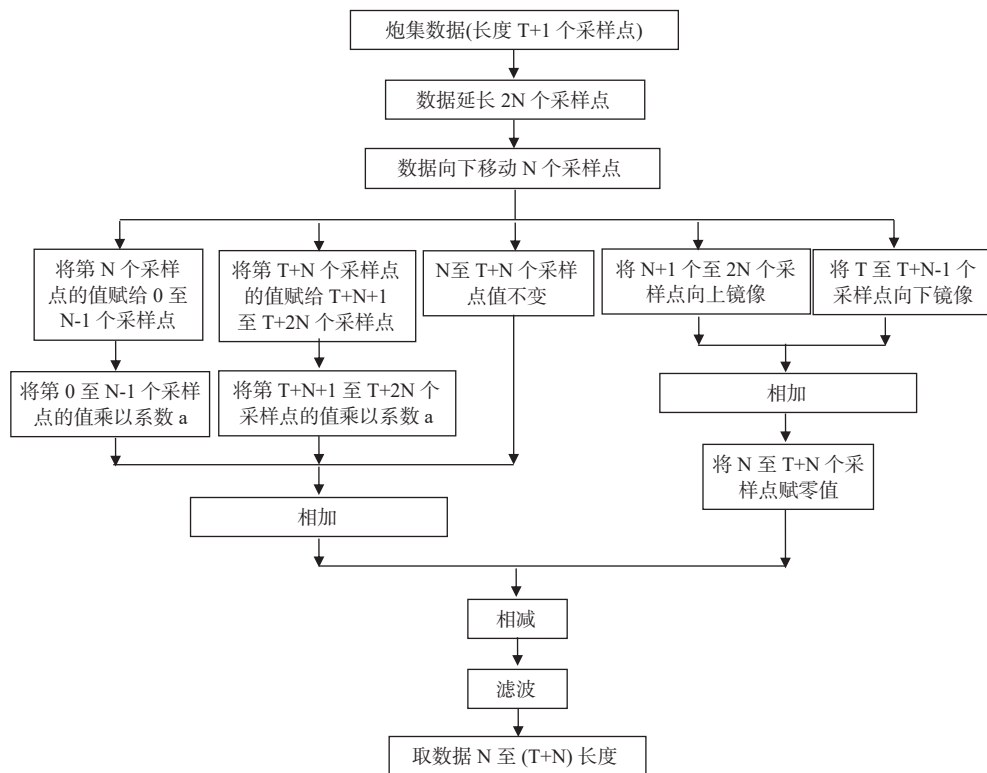


图1 流程示意图

Fig.1 Flow schematic diagram

加上 N 个采样点的边界, N 的大小取决于滤波参数, 一般 < 500 ms。确定镶边宽度 N 后, 进行顶底镶边初始化, 原始数据 $x(k)$ 镶边后变为 $x_1(k)$, 长度由 $T+1$ 个采样点变为 $T+2N+1$ 个采样点, 对应关系如公式(1)所示:

$$\begin{cases} x_1(k) = 0, & 0 \leq k \leq N-1 \\ x_1(k) = x(k-N), & N \leq k \leq T+N \\ x_1(k) = 0, & T+N+1 \leq k \leq T+2N \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 镶边区域数据自驱动赋值

对镶边区域进行数据自驱动赋值, 利用首尾 N 个采样点长度的原始数据, 通过建立连续函数获得光滑的边界数值。公式(1)为镶边后未赋值的数据, 对公式(1)中 $x_1(k)$ 进行边界自驱动赋值。首先, 将 $x_1(k)$ 的第 N 个采样点的值赋给 0 至 $N-1$ 个采样点, 将 $x_1(k)$ 的第 $T+N$ 个采样点的值赋给 $T+N+1$ 至 $T+2N$ 个采样点, 并将新赋值的上下边界值乘以 a ; 中间部分(N 至 $T+N$ 个采样点)数据的值不变, 得到的数据作为第一部分数据 $x_{1p1}(k)$ 。然后, 将 $x_1(k)$ 的第 $N+1$ 至 $2N$ 个采样点的值向上镜像, 得到第 0 至 $N-1$ 个采样点的值; 将 $x_1(k)$ 的第 T 至 $T+N-1$ 个采样点的值向下镜像, 得到第 $T+N+1$ 至 $T+2N$ 个采样点的值; 将第 N 至 $T+N$ 个采样点的值赋 0 , 得到的数据作为第二部分数据 $x_{1p2}(k)$ 。最后, 用第一部分

数据 $x_{1p1}(k)$ 减去第二部分数据 $x_{1p2}(k)$, 得到数据自驱动镶边赋值后的数据 $x_b(k)$, 具体表达如公式(2)所示:

$$\begin{cases} x_b(k) = a \times x_1(N) - x_1(2N-k), & 0 \leq k \leq N-1 \\ x_b(k) = x_1(k), & N \leq k \leq T+N \\ x_b(k) = a \times x_1(T+N) - x_1(2T+2N-k), & T+N+1 \leq k \leq T+2N \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的 a 值经过试验取 2 或 3 即可得到理想的边界, 这样得到的边界与数据是连续变化的, 不存在人为给定的波阻抗界面。

1.2.3 去掉镶边数据

对镶边完成后的数据进行带通滤波, 滤波后将边界去掉, 并恢复为原始数据的长度, 以此实现无边界异常的带通滤波器。对公式(2)带通滤波后的数据为 $x_{bf}(k)$, 长度为 $T+2N+1$ 个采样点, 则去掉镶边数据的结果 $x_f(k)$ 如公式(3)所示:

$$x_f(k) = x_{bf}(k+N), 0 \leq k \leq T \quad (3)$$

2 效果展示

选择某实际地震资料进行滤波应用。图 2a 为原始数据, 图 2b 为基于原始数据进行数据自驱动

镶边后的数据, 可见镶边后的数据光滑, 无异常边界值。图 3a 为对图 2b 进行 3 Hz 低截滤波后的结果, 可见在镶边位置出现带通滤波截断效应。图 3b 为去掉镶边边界后的最终滤波结果, 可见无带通滤波截断效应。图 4a、b 分别为利用常规带通滤波和

本文数据自驱动镶边带通滤波算法后得到的滤波结果, 可见利用常规带通滤波算法后数据的顶底会出现异常截断效应噪音, 而利用本文提出的带通滤波结果彻底压制了该类噪声, 避免了该类噪声对浅水偏移成像及深部有效反射的成像影响。

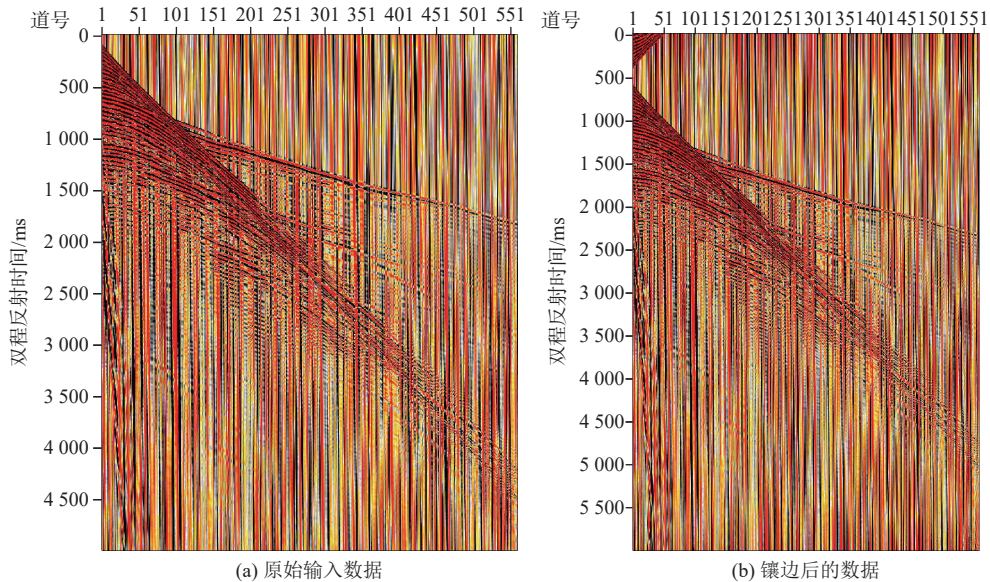


图 2 数据镶边前后对比

Fig.2 Shot gather comparison before and after data edging

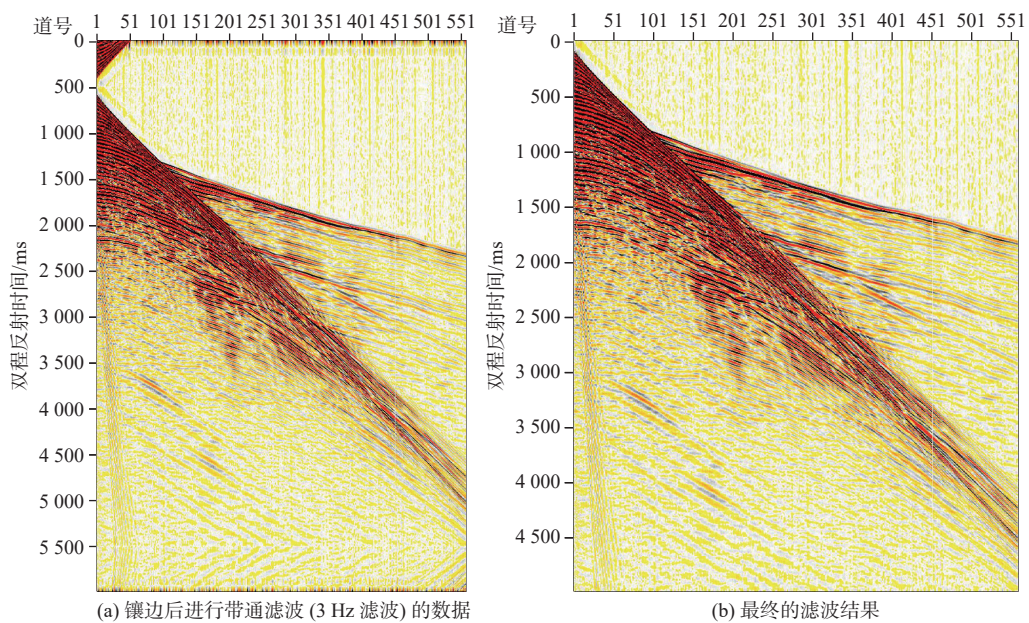


图 3 数据镶边后带通滤波结果

Fig.3 Bandpass filtering results after data edging

3 结论

本文提出的数据驱动的边缘效应滤波方法可

以消除由于数据截断导致的边界异常效应, 具有以下重要意义: ①有效改善浅水地震数据海底成像质量; ②对于深部地震反射信号, 在压制噪声的同时最大限度保留了有效波的能量与相位特征; ③降低

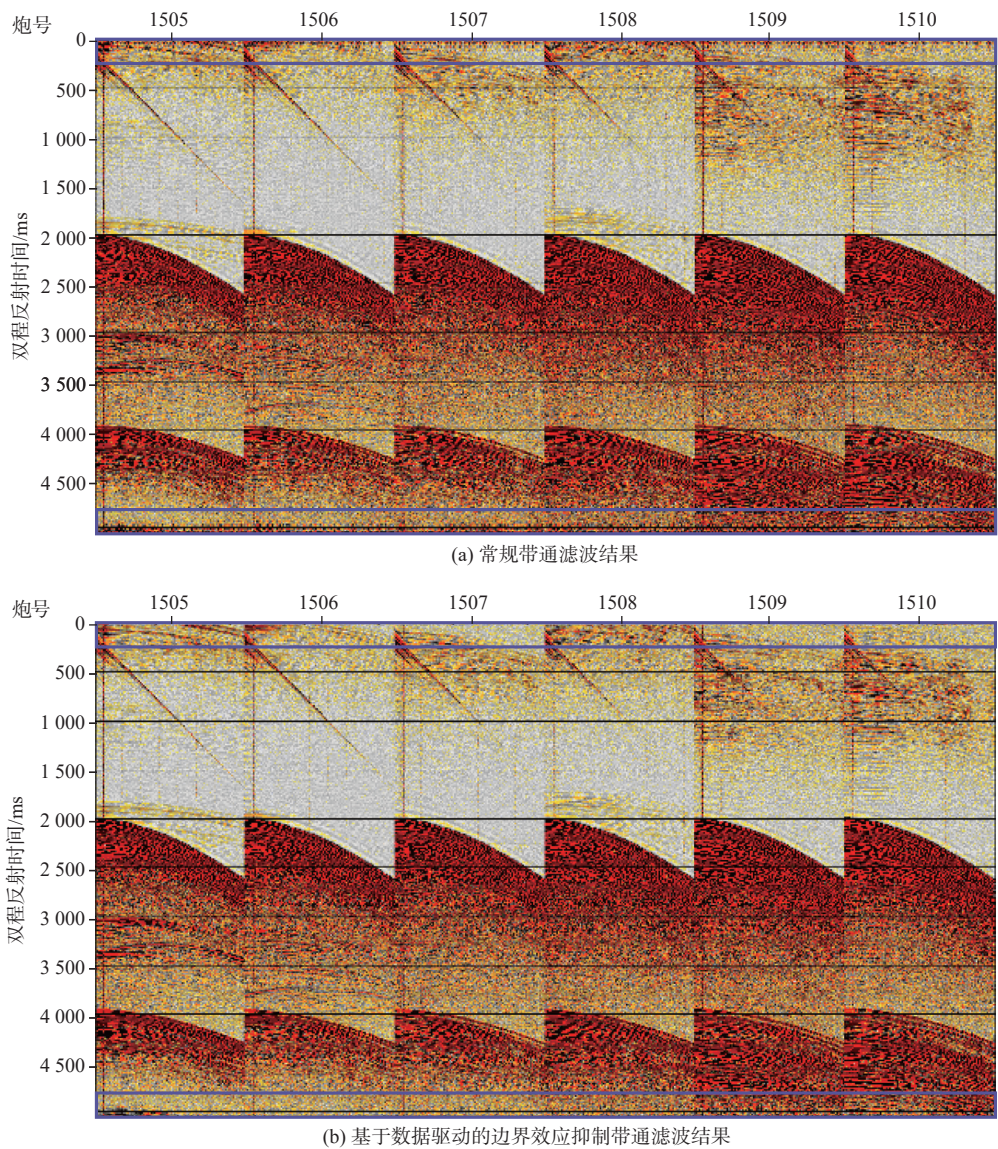


图 4 基于数据驱动边界效应抑制带通滤波方法与常规带通滤波方法对比

Fig.4 Comparison between the data-driven approach to boundary effect suppression in band-pass filtering method and conventional bandpass filtering methods

异常噪声对成像过程的干扰,避免因数据污染导致的偏移归位偏差与假象生成,提高成像结果的信噪比、保证构造保真度。

未来可进一步结合机器学习算法,开发适用于

浅水地震数据的智能自适应滤波模型,实现海底成像算法的智能化升级,以应对更复杂的浅海沉积环境与强干扰场景。