

张旭东, 尹成, 赵斌. 远场子波在海洋地震资料信号处理中的应用 [J]. 华南地震, 2020, 40(1): 67-72. [ZHANG Xudong, YIN Cheng, ZHAO Bin. Application of Far-field Wavelet in Signal Processing of Marine Seismic Data [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 67-72]

远场子波在海洋地震资料信号处理中的应用

张旭东^{1,2,3}, 尹成², 赵斌^{1,3}

- (1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室 广州海洋地质调查局, 广州 510075;
2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 西南石油大学, 成都 610500;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

摘要: 海洋地震勘探中应用最广泛的震源是空气枪, 其具有稳定可靠, 子波一致性好, 频率成分丰富等特点。在海洋地震资料处理解释中, 气枪震源远场子波不仅决定着地震资料品质, 而且广泛用于确定性子波反褶积、宽频处理等, 具有不可替代的作用。此方法由地震数据辅助道中记录的近场子波推算得到远场子波, 不仅避免了测量成本高且操作难度大的实测远场子波, 而且得到的远场子波比地震资料直接提取子波精度要高。利用得到的远场子波可以进一步求取零相位化算子(包括压制气泡算子和整形算子), 用作消除地震数据气泡效应影响, 并进行零相位化处理。通过实际地震资料对所述方法进行了验证, 得到的结果不仅使地震剖面上反射波的续至相位得到了有效抑制, 子波形态得到了很好的恢复, 而且消除了非零相位数据对高分辨率处理和解释标定的影响。从实际数据处理效果来看本方法是切实可行的。

关键词: 海洋地震; 远场子波; 零相位化算子; 虚反射; 气泡效应

中图分类号: P641.46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)01-0067-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.010

Application of Far-field Wavelet in Signal Processing of Marine Seismic Data

ZHANG Xudong^{1,2,3}, YIN Cheng², ZHAO Bin^{1,3}

- (1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: The most widely used source in marine seismic exploration is the air gun, which is characterized by stable, reliable, good wavelet consistency and rich frequency components. In the interpretation and processing of marine seismic data, the far-field wavelet of air gun source not only determines the quality of seismic data, but also is widely used for deterministic wavelet deconvolution, broadband processing and so on. It plays an irreplaceable role. In this paper, the far-field wavelets are derived from the near-field wavelets recorded in the seismic data-assisted trace, which not only avoids the measured far-field wavelets with high measurement cost

收稿日期: 2019-10-31

基金项目: 同济大学海洋地质国家重点实验室开放基金资助(MGK1920; MGK202007); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0208、GML2019ZD0207)

作者简介: 张旭东(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事天然气水合物地震资料成像及反演研究。

E-mail: zhangxd_911@126.com.

and high operation difficulty, but also obtains far-field wavelets with higher accuracy than directly extracting wavelets from seismic data. The obtained zero-phase operator (including the suppression bubble operator and the shaping operator) can be further obtained by using the obtained far-field wavelet, which can be used to eliminate the influence of the virtual reflection and the bubble effect on the seismic data, and perform zero-phase processing. The method is verified with actual seismic data, and the results not only effectively suppress the continuation phase of reflection wave on seismic section, but also eliminate the influence of non-zero phase data on high-resolution processing and interpretation calibration. The method is practical and reliable from the actual data processing effect.

Keywords: Marine seismic; Far-field wavelet; Zero-phase operator; Bubble effect

0 前言

海洋地震勘探中采用气枪阵列作为震源,其产生的远场子波是海洋地震资料处理中重要的参数,由于观测环境及经济成本的限制,远场子波一般不采用直接观测的方法得到,而是通过记录的近场子波来模拟^[1-2]。另外气枪阵列作为震源产生地震子波不是最小相位的,相位随着频带的变化而漂移,影响地震资料的高分辨处理^[3]。非零相位反射波的峰值并不代表地层波阻抗界面,在进行海洋地震资料解释时会引起地震层位标定误差,而获得零相位化的地震资料是解决这一问题的最佳途径^[4]。

本文利用 Ziolkowski(1982)提出的理想阵列这一概念,通过实际测量得到的受到气枪间相干作用影响的近场子波模拟出气枪阵列的远场子波,利用该远场子波求取零相位化算子(包括整形算子、压制气泡算子)并用于实际地震资料,为后续地震资料处理和地质解释提供高质量的零相位资料^[5-6]。

1 近场子波模拟远场子波方法

海洋地震勘探的气枪阵列中各枪之间激发互不影响,各自单独产生单枪震源子波,在近场检波器中记录到的信号,是经过传播距离 r 后直接到达检波器的单枪震源子波和经过传播距离 R 后接收到的虚反射叠加而成^[7],如图 1 所示。当检波器和枪阵距离较近时,也就是近场区时, r 和 R 相差较大,由于球面扩散使得单枪震源子波与虚反射的振幅差异较大,随着检波器和震源之间距离的增加,虚反射的传播路径逐渐接近震源子波路径,这时两者受到的球面扩散引起的衰减近似相同,当这个距离 d 满足经验公式:

$$d > \frac{D^2}{\lambda_{\min}} = f \frac{D^2}{c} \quad (1)$$

式(1)中, f 为激发子波频率, λ_{\min} 为激发子波最小波长, D 为气枪阵列空间最大尺寸, c 为水中声波速度,这个区域即为远场区。

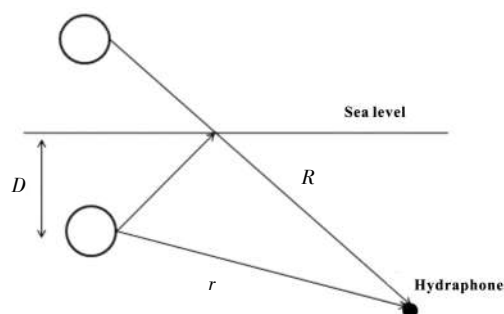


图 1 震源子波和虚反射传播路径

Fig.1 Reflection path of source wavelet and fictitious reflection

以本文所举近场子波实际测量来说明,气枪阵列由 10 个子阵组成,容量为 1140 in³,压力为 2000 psi 的 GI 枪阵列,分别在各个单元(单枪或相干体)上方 1.1 m 处装配了 6 个近场检波器(见图 2)。每个近场检波器分别记录了近场子波(见图 3)。本次采集所采用的主要参数为:阵列沉放深度为 4 m,采样间隔 0.5 ms,子波记录长度 400 ms。首先根据枪阵参数建立单枪理想震源子波与近场子波的叠加关系,利用该关系求取单枪理想震源子波,这个过程中需要考虑震源虚反射对近场子波的影响,然后根据检波器的位置求取所有理想震源子波在检波器处形成的远场子波的形态^[8],这通过考虑单个理想子波的传播与叠加来实现。通常的方法是在时间域实现,所有数据都是时间域采样的离散值,由于理想震源子波传播时间不是采样间隔的整数倍,这时时间域方法就涉及到重采样,存在误差,因此本文在频率域实现这一过程,理想震源子波的传播时间延迟可以通过相位延迟来精确表达,没有误差,可以求取精确的单枪理想子波,进而获得可靠的远场子波^[9](见图 4)。

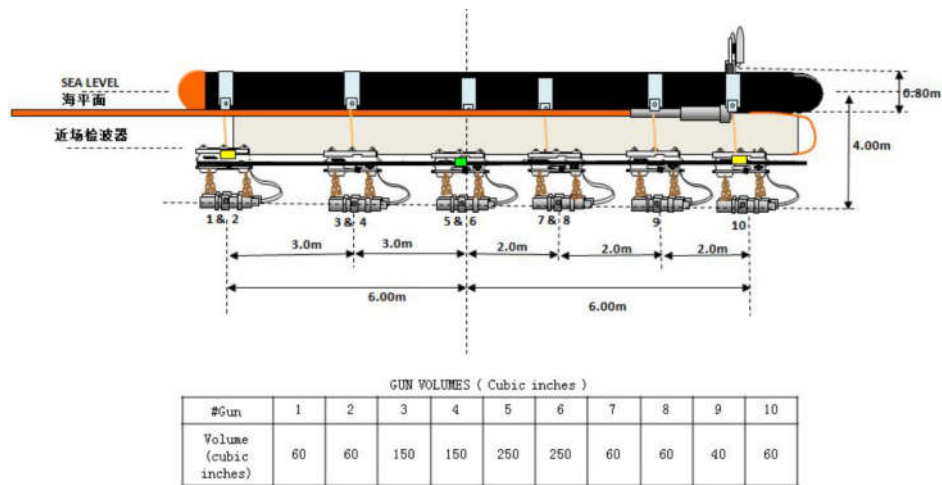


图 2 气枪阵列组合(6 个子阵)
Fig.2 Combination of air gun array (six subarrays)

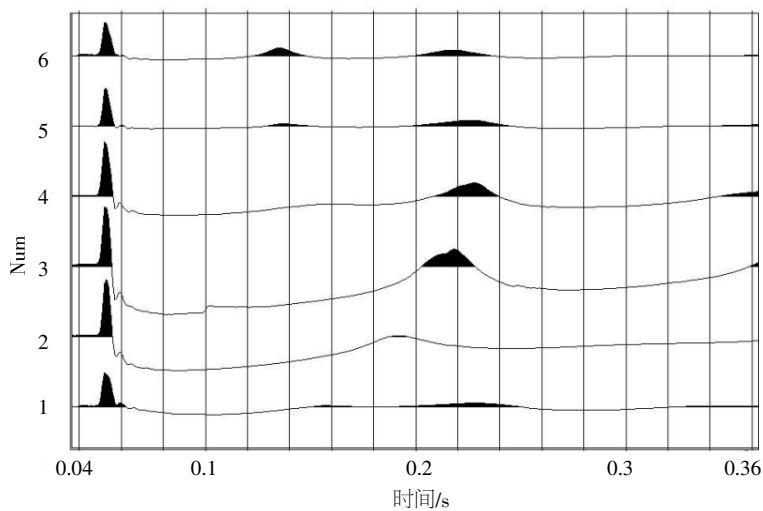


图 3 图 2 中近场检波器记录的近场子波
Fig.3 Near field wavelet recorded by near field detector in fig.2

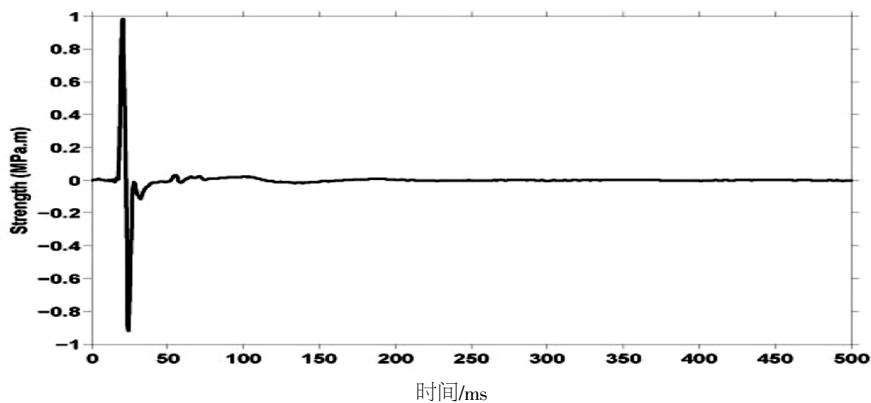


图 4 利用近场子波推算得到的远场子波
Fig.4 Far field wavelet calculated by near field wavelet

在气枪相干的情况下，气枪阵列相当于一组不相干的理想震 $P_i'(t)$ 所组成的理想阵列，假设海面反射系数为 -1 ，则近场检波器接收到的近场子波在频率域可以表示为式(2)：

$$P_j(\omega) = \sum_{i=1}^n P_i'(\omega) \left[\frac{1}{r_{ij}} \exp(i\omega - \frac{r_{ij} - 1}{c}) + \frac{R}{(r_g)_{ij}} \exp(i\omega - \frac{(r_g)_{ij} - 1}{c}) \right] \quad (2)$$

其中 $P_i'(\omega)$ 为第 i 个理想震源子波, $P_j(\omega)$ 为第 j 个近场子波, r_{ij} 是第 i 个理想震源到第 j 个检波器的距离, R 为海平面的反射系数(接近于-1), $(r_g)_{ij}$ 为第 i 个虚震源到第 j 个检波器的距离, ω 为

频率。对于 n 个气枪组成的气枪阵列, 可以得到 n 个方程组成的方程组。此方程组可以写成矩阵形式: $AX=B$, 其中

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{11}} \exp(i\omega \frac{r_{11}-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_{11}} \exp(i\omega \frac{(r_g)_{11}-1}{c}), & \dots, & \frac{1}{r_{1n}} \exp(i\omega \frac{r_{1n}-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_{1n}} \exp(i\omega \frac{(r_g)_{1n}-1}{c}) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{r_{m1}} \exp(i\omega \frac{r_{m1}-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_{m1}} \exp(i\omega \frac{(r_g)_{m1}-1}{c}), & \dots, & \frac{1}{r_{mn}} \exp(i\omega \frac{r_{mn}-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_{mn}} \exp(i\omega \frac{(r_g)_{mn}-1}{c}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$X = \begin{bmatrix} P_1'(\omega) \\ P_2'(\omega) \\ \vdots \\ P_n'(\omega) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} P_1(\omega) \\ P_2(\omega) \\ \vdots \\ P_n(\omega) \end{bmatrix} \quad (4)$$

X 为单枪震源理想子波的频谱向量, A 是关于 i, j, ω 的三维矩阵, i, j 为从 1 到 n 的循环, 将

得到的 X 用式(5) 做反傅里叶变换得到时间域的单枪震源理想子波。

$$f(\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{r_i} \exp(i\omega \frac{r_i-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_i} \exp(i\omega \frac{(r_g)_i-1}{c}) \right] P_i'(\omega) \quad (5)$$

式(5)中, $P_i'(\omega)$ 为频率域第 i 个理想震源子波, $f(\omega)$ 为要求的远场子波的频谱, r_i 为第 i 个理想震

源到远场点的距离, $(r_g)_i$ 为第 i 个虚震源到远场点的距离。将式(5) 整理为 $f(x)=BX$, 其中

$$B = \left[\frac{1}{r_1} \exp(i\omega \frac{r_1-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_1} \exp(i\omega \frac{(r_g)_1-1}{c}), K, \frac{1}{r_n} \exp(i\omega \frac{r_n-1}{c}) - \frac{1}{(r_g)_n} \exp(i\omega \frac{(r_g)_n-1}{c}) \right] \quad (6)$$

利用式(5)可以求得空间任意点的远场子波频谱, 对其做反傅里叶变换, 可得时间域远场子波。

2 远场子波的应用

气枪阵列由具有不同容量、不同型号, 能够输出不同能量、不同频率的单枪经过优化组合而成, 可以实现相干加强并最大限度压制气泡, 从而获得具有所需频带特征子波, 最终实现对目

标层位的有效勘探^[10]。尽管枪阵组合在设计时就充分考虑了对气泡的压制, 但实际采集中气枪子波还是会受到气泡效应的影响, 在频谱上气泡效应表现在低频端^[11], 这是地震勘探不需要的, 而且气泡效应具有明显的周期性, 可以通过预测反褶积来消除, 另外通过子波整形技术得到零相位化算子, 将上述两个算子褶积后得到最终的零相位化算子^[12], 具体流程见图5。

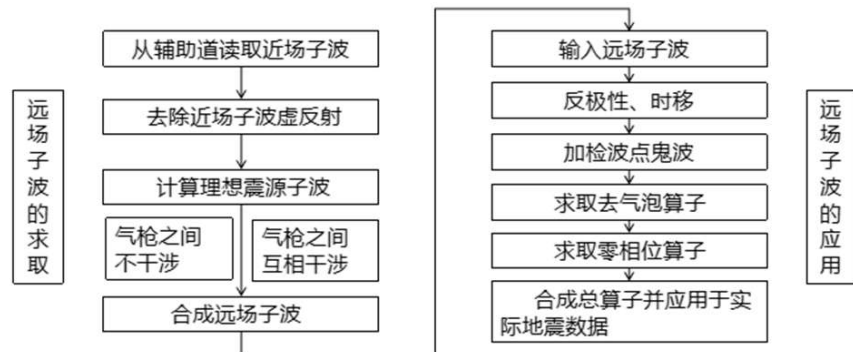


图5 远场子波求取及应用流程

Fig.5 Acquisition and application of far field wavelet

得到最终的零相位化算子后,还可以利用褶积过程中相位相加特性来验证^[13]。输入的带电缆鬼波的震源模拟子波的相位谱与零相位化算子的相位谱是相反的,二者相加的结果应趋于零相位。这可以作为检验零相位算子正确性的一种方法,也可以将求取的零相位化算子应用于输入子波,得到期望的零相位信号来验证求取算子的正确性^[14]。

3 实际应用效果分析

本文所采用的实际资料位于南海北部陆坡区,

图6、图7是远场子波应用前(a)、后(b)炮集和炮集频谱,可以看到经过零相位化算子应用后,气泡对子波的影响基本消除,同时子波整形为零相位叠加剖面,波组特征变得更加清晰,同相轴连续性得到明显改善。通过震源子波反褶积处理,远场子波的气泡和虚反射得到很好压制,子波形状得到很好的恢复。图8为远场子波应用前(a)、后(b)叠加剖面,由远场子波得到的零相位化算子应用后,气泡被很好的压制,BSR的反极性特征更为明显,波组特征更加清晰,信噪比和分辨率都得到很大改善。

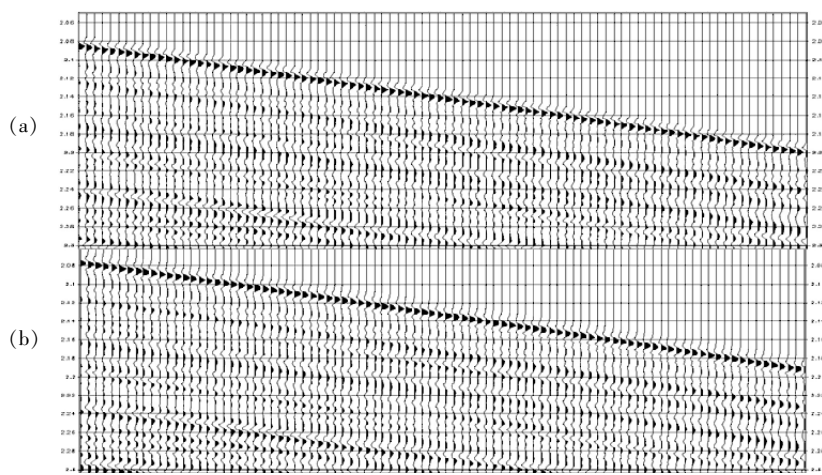


图6 远场子波应用前(a)、后(b)炮集

Fig.6 Shot gather before (a) and after (b) far field wavelet application

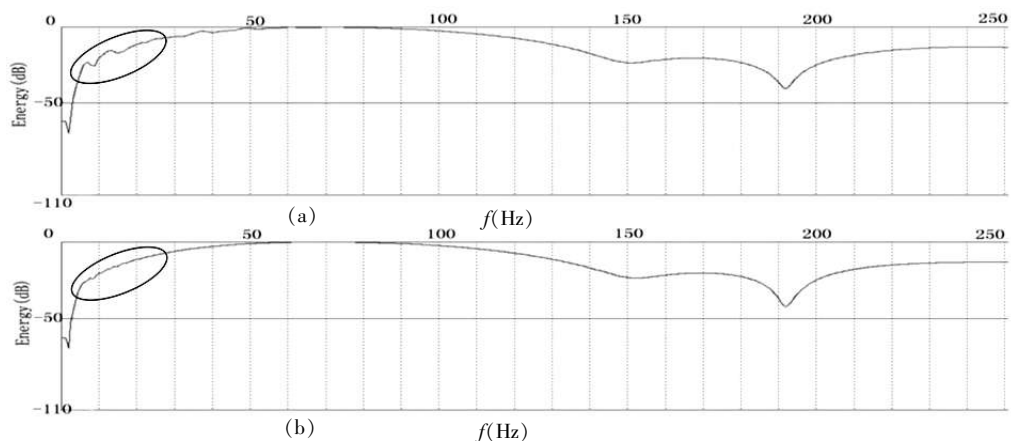


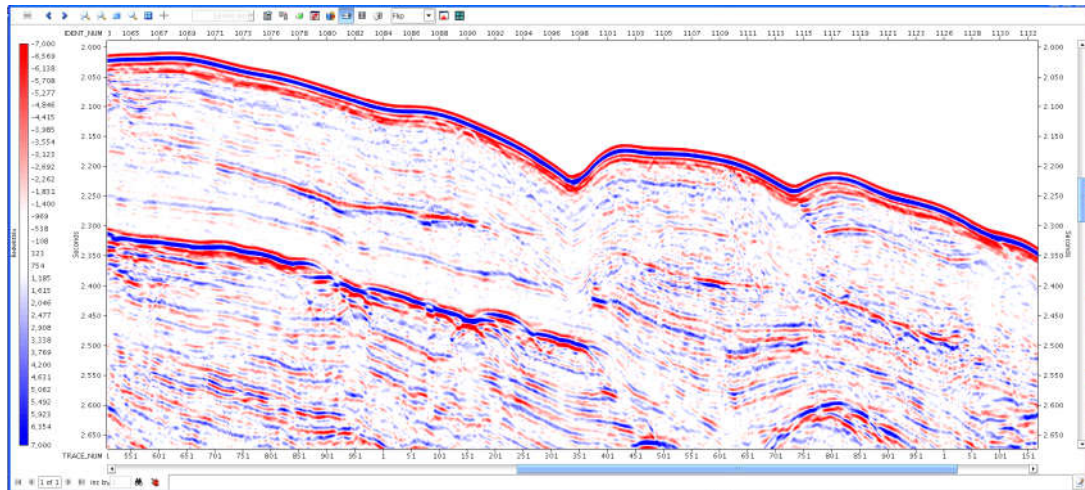
图7 远场子波应用前(a)、后(b)炮集频谱

Fig.7 Shot gather spectrum before (a) and after (b) far field wavelet application

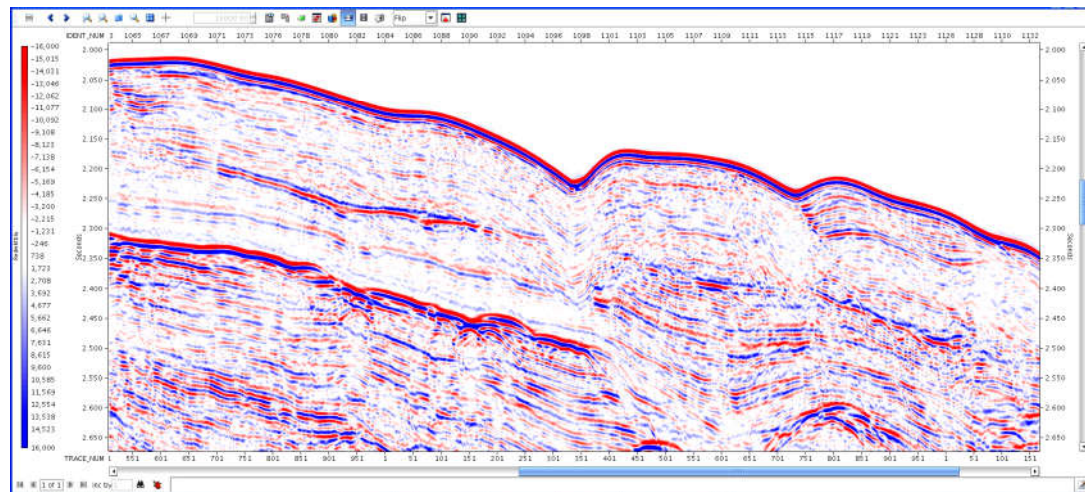
4 结语

在海洋地震资料处理中,实际获得的气枪子波并不是人们期望的形态,而是被虚反射和气泡效应改造过的子波。本文通过气枪阵列近场子波模拟得到可靠的远场子波,再进一步利用该远场子波得到零相位化算子。通过上述震源子波处理

技术可以基本消除气泡效应影响,获得的零相位化资料相位稳定、可靠,能为地震资料拼接处理、高分辨率处理等打好基础,同时为准确标定油气藏顶、底界面,精确落实圈闭范围和尖灭追踪等精细解释工作提供保障。



(a)



(b)

图8 远场子波应用前 (a) 后 (b) 叠加剖面

Fig.8 Stack profile before (a) and after (b) far field wavelet application

参考文献:

- [1] 牟永光, 陈小宏, 李国发, 等. 地震数据处理方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [2] 伊尔马兹·渥. 地震资料分析—地震资料处理、反演和解释(上册)[M]. 刘怀山, 王克斌, 童思友, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [3] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [4] 苏贵仕, 沈克非, 丁学垠. 地震数据处理中关于子波相位特性的探讨 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43 (增刊 2): 121-124
- [5] 孙振刚, 李宏图, 张晓渝, 等. 海洋拖揽地震资料处理关键技术[J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊 A): 192-194
- [6] 宁日亮, 张文波, 张淑梅, 等. 深海拖揽二维地震资料处理技术[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 519-524
- [7] 李振勇, 姜浩, 李东升. 海洋地震数据处理技术探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(S), 8-13
- [8] 陈孝格. 海上气枪震源地震子波研究进展 [J]. 中国海上油气, 1994, 8(1): 60-65
- [9] 吕景英, 蒋进勇. 地震子波零相位化改造的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(2): 121-123
- [10] 刘金俊, 王修田, 刘怀山. 子波零相位化、反褶积与地震记录分辨率的关系[J]. 海洋地质前沿, 2000, 16(4): 5-8
- [11] 杨怀春, 高生军. 海洋地震勘探中空气枪震源激发特性研究[J]. 石油物探, 2004, 43(4): 323-326
- [12] 陈浩林, 全海燕, 刘军, 等. 基于近场测量的气枪阵列模拟远场子波[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(6): 703-707.
- [13] 倪成洲, 陈浩林, 牛宏轩. 基于近场测量气枪阵列远场子波模拟软件研发[J]. 物探装备, 2008, 18(1): 11-17
- [14] 张旭东, 尹成, 陈玺. 垂直观测系统海洋地震资料信号处理研究[J]. 华南地震, 2018, 38 (2): 1-7.