

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. [ZHANG Xudong, YIN Cheng, CHEN Xi. Study on Signal Processing of Marine Seismic Data in Vertical Observation System [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 1-7]

垂直观测系统海洋地震资料信号处理研究

张旭东^{1,2}, 尹成¹, 陈玺²

(1. 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;
2. 国土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)

摘要: 海洋地震资料处理中, 通常采用的提取远场子波方法是从地震资料中直接提取和根据自由气泡震荡理论中不相干子波叠加算法由近场子波推算远场子波, 但这两种方法都不精确。首先分析了由 OBS 模拟垂直观测地震系统实测得到远场子波, 进而获取零相位算子(包括零相位算子、压制气泡算子和压制虚反射算子)的原理和实际效果。利用理论模型和实际数据对所述方法进行了检验, 得到的结果不仅消除虚反射、气泡效应影响, 而且整形为零相位。通过上述处理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此方法是切实可靠的。

关键词: 垂直观测系统; 零相位算子; 虚反射; 气泡效应

中图分类号: P631.46 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)02-0001-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.001

Study on Signal Processing of Marine Seismic Data in Vertical Observation System

ZHANG Xudong^{1,2}, YIN Cheng¹, CHEN Xi²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: In ocean seismic data processing, the commonly used method of extracting far field wavelet is to directly extract the far-field wavelet from the seismic data and calculate the far-field wavelet from the near-field wavelet according to the irrelevant wavelet superimposition algorithm in the free-bubble oscillation theory. However, neither method is accurate. In this paper, the principle and the practical effect of the zero-phase operator (including zero-phase operator, de-bubble operator and de-ghost operator) obtained by measuring the far-field wavelet obtained from the simulated vertical cable seismic system of OBS are analyzed. Using the theoretical model and the actual data, the method described in this paper is tested. The results obtained not only

收稿日期: 2016-10-26

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189642)

作者简介: 张旭东(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震资料成像及反演研究。

E-mail: zhangxd_911@126.com.

eliminate the effects of ghost and bubble, but also shape the seismic data to zero phase. The above process eliminates the influence of non-zero phase data on high-resolution processing and interpretation calibration, and the method is reliable from the actual data processing effect.

Keywords: Vertical cable; Zero phase operator; Ghost; Bubble effect

0 引言

地震子波提取方法总体上可以分为确定性子波提取方法和统计性子波提取方法。确定性子波提取方法不需要对反射系数分布作任何假设,能得到较为准确的子波。统计性子波需要对地下地震资料和反射系数分布进行假设,得到子波精度与假设条件满足程度有关。

传统方法利用海洋地震资料直接提取地震子波,受不确定因素影响较大,效果不太理想。近年来,一些海洋地震采集通过在枪阵上放置近场检波器获取近场子波,再根据自由气泡震荡理论中不相干子波叠加算法求解方程组,获得远场子波。但是上述两种方法均基于一定假设,得到的远场子波精度有限。2015年广州海洋地质调查局在南海进行了模拟垂直观测系统试验,利用垂直观测系统在深水海底实测获得精确远场子波。利用精确远场子波可以进行确定性子波提取,而且利用实测得到的远场子波求取零相位化算子(包括零相位算子、压制气泡算子和压制虚反射算子)并用于实际地震资料^[8-9],取得了不错的效果。为后续地震资料处理和地质解释提供高质量的资料^[10]。

1 垂直观测系统数据及提取地震子波方法

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,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: $d > \frac{D_2}{\lambda_{\min}} = f \frac{D^2}{C}$,其中 f 为激发子波频率; D 为激发子波最小波长;为水中声波速度。对于本次试验来说,气枪阵列

空间最大尺寸为30 m,声波在水中速度取1 500 m/s,对于最大频率200 Hz的子波,求得的远场距离为120 m,而实际垂直观测系统距离震源最近距离也有1 800 m,完全满足远场要求。

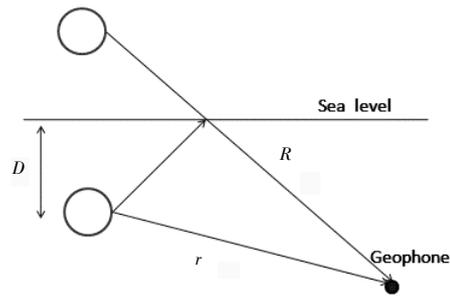


图1 震源子波和虚反射传播路径

Fig.1 Reflection path of source wavelet and fictitious reflection

2015年广州海洋地质调查局利用多台OBS(Ocean bottom seismograph)模拟实现垂直观测系统。OBS模拟垂直观测系统总长度200 m,接收节点数量3个,节点间距25 m,其整体结构如图2所示,OBS采样频率最高达1 kHz,动态范围大于120 dB,最长工作时间可达24 d(4 ms)。OBS最大工作水深5 000 m,可以记录水听器分量(P分量)、垂直分量(Z分量)、水平分量(X分量)和水平分量(Y分量)。OBS模拟垂直观测系统采集参数见表1。

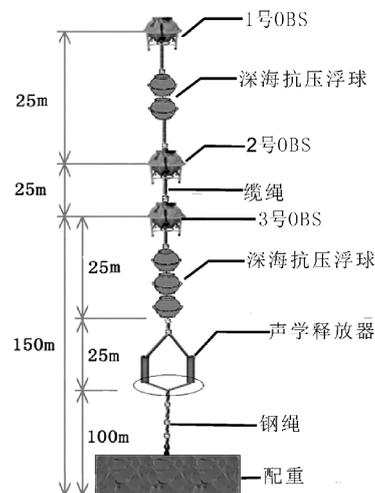


图2 垂直观测系统结构图

Fig.2 Structure of vertical cable

表 1 垂直缆地震系统采集参数

Table 1 Acquisition parameter of vertical cable seismic system

节点数	震源沉放深度/m	节点间距/m	记录长度/ms	炮间距/m	气枪类型	采样率/ms	枪阵容量
3	5	25	8 000	25	G.I.枪	1	540 cu.in.

本次试验中，OBS 模拟垂直观测系统与常规拖缆联合采集，获得了天然气水合物立体探测地震数据。试验共采集测线 17 条，每条长 17 km，采集面积 154 km²，垂直观测系统投放位置位于采集工区中心。图 3 为 949 600 测线中三个接收节点水听器分量(P 分量)的共接收点道集数据。从图 3 中可以看出，上、中、下三个 OBS 记录的有效波、多次波、折射波都非常清晰，而且由于接收节点靠近海底且位置相对固定，采集数据具有较高信噪比，这

也是垂直观测系统采集地震资料优于常规地震资料之处。OBS 接收节点的直达波到达时间与其节点深度吻合很好，直达波和海底反射波同相轴相互无干涉。在远偏移距处，直达波与虚反射和初至波分离明显，经过反复比较，从 1 号 OBS 上选取离 OBS 模拟垂直观测地震系统最近的 949 600 测线数据，将其直达波拉平，选取波形稳定的一段叠加后截取 500 ms，即为提取的远场子波(如图4)。

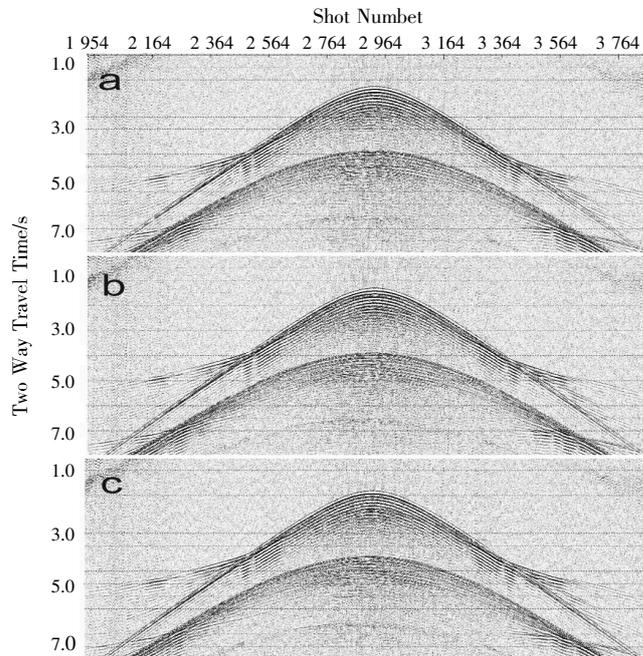


图 3 OBS 接收(测线 949600)水听器分量共接收点道集数据 (a.1 号 OBS, b.2 号 OBS, c.3 号 OBS)

Fig.3 Common receiving point gather data received by OBS (Line 949600) hydrophone component (a.No.1 OBS, b.No.2 OBS, c.No.3 OBS)

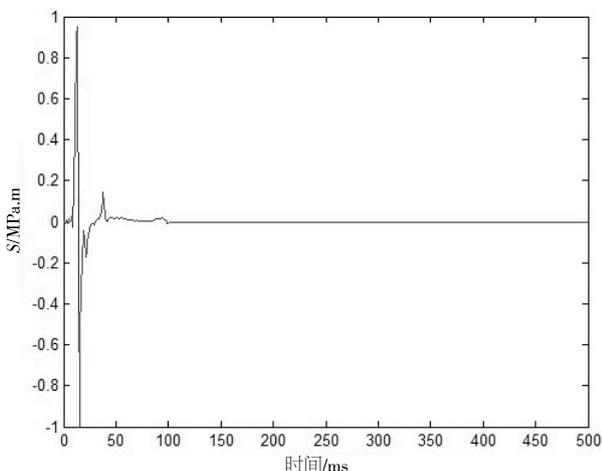


图 4 垂直观测系统数据提取的子波

Fig.4 Wavelet extracted from vertical cable data

2 远场子波的应用

远场子波最主要的应用是求取零相位化算子，再把求取的零相位化算子应用到地震资料处理中，实现地震资料的零相位化处理^[24]。地震资料零相位化算子由压制气泡算子和整形算子两部分组成，整形算子又包括零相位整形算子和压制虚反射算子。

2.1 压制气泡算子求取

气枪阵列由具有不同容量、不同型号，能够输出不同能量、不同频率的单枪波形经过优化组合而成，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的子波, 最终实现对目标层位的有效勘探^[25]。尽管枪阵组合在设计时就充分考虑了对气泡的压制, 但如图 5a 所示的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, 见图 6a, 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, 从褶积过程中相位

相加特性可知, 输入的带电缆鬼波的远场子波的相位谱(图 7a) 与零相位化算子的相位谱(图 7b) 是相反的, 二者相加的结果应趋于零相位(图 7c)。这一特性可作为检验零相位算子(图 8)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(图 5a), 得到期望的零相位信号(图 9)来验证求取算子的正确性。

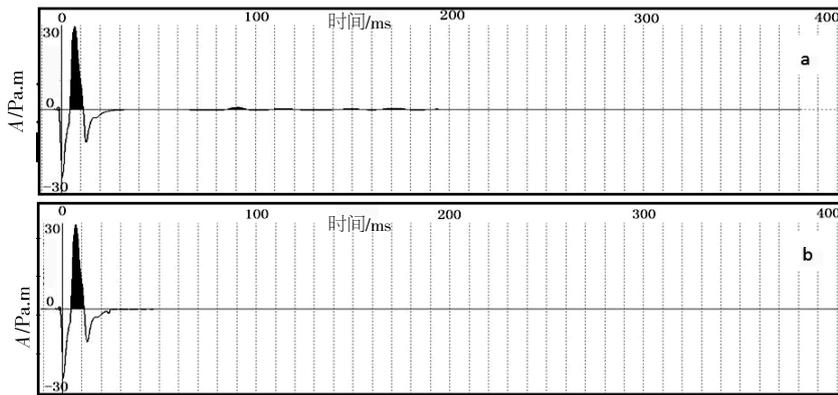


图 5 带电缆鬼波的远场子波(a)及去气泡后的带电缆鬼波的远场子波(b)

Fig.5 Far-field wavelet with ghost wave of cable (a) and far-field wavelet with cable ghost wave after bubble (b)

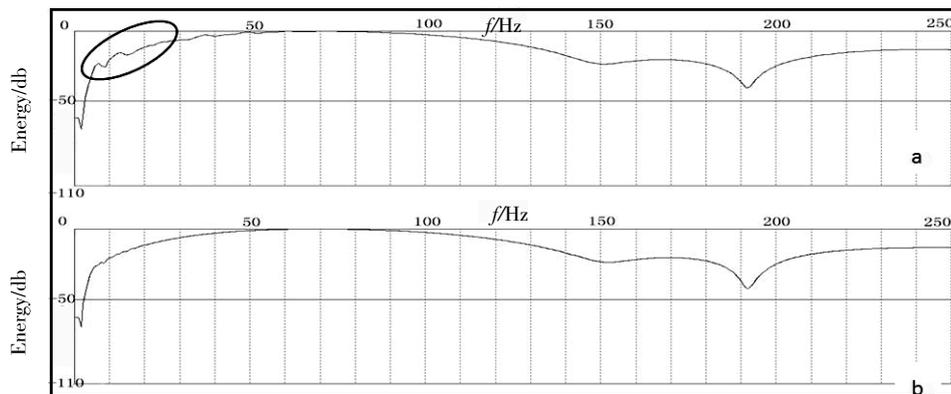


图 6 a、b 分别为图 5 中 a、b 所示子波频谱

Fig.6 a and b respectively are spectrum for fig5 a and b

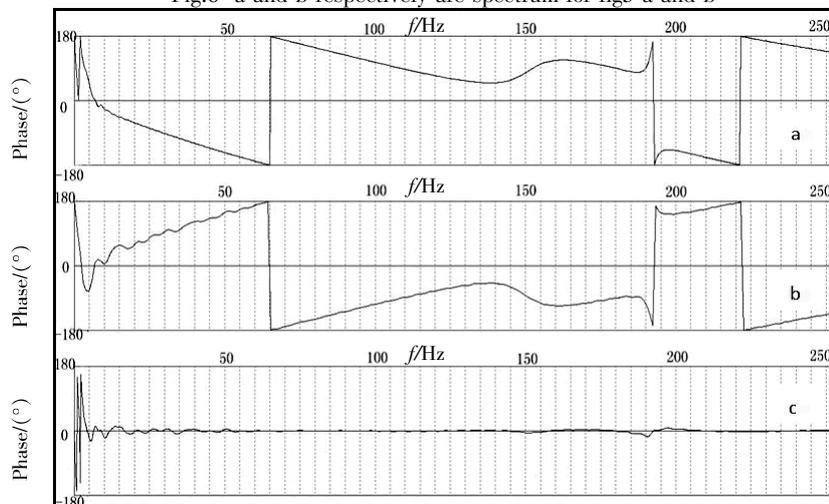


图 7 a.去气泡后相位谱 b.零相位化算子相位谱 c.零相位子波相位谱

Fig.7 (a) Phase spectrum of de bubble (b) Phase spectrum of zero phase operator (c) Phase spectrum of zero phase wavelet

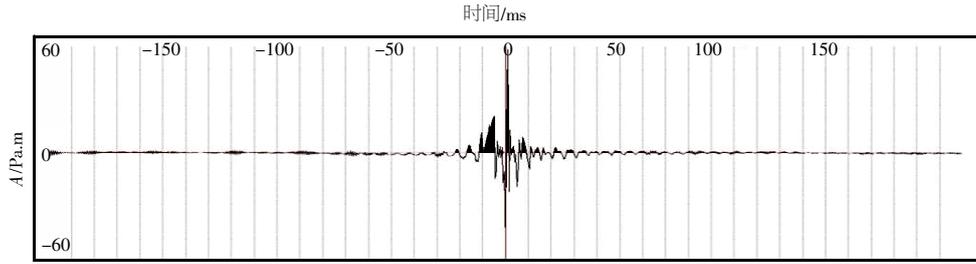


图 8 零相位化算子

Fig.8 Zero phase operator

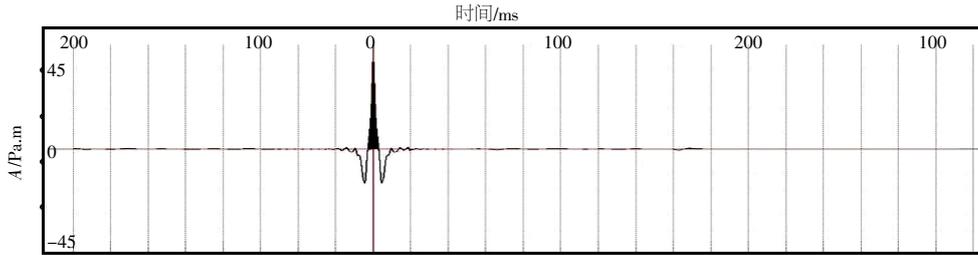


图 9 零相位子波

Fig.9 Zero phase wavelet

首先地震记录的褶积模型为:

$$x(t)=\omega(t)*e(t)+n(t) \quad (1)$$

其中 $x(t)$ 为地震记录, $\omega(t)$ 为地震子波, $e(t)$ 为地层脉冲响应, $n(t)$ 为随机噪音。当我们假设 $n(t)0$, 震源波形已知时, 公式(1)可以表示为:

$$x(t)=\omega(t)*e(t) \quad (2)$$

海上地震勘探可以记录震源组合的远场子波, 这样公式(2)可以改写为:

$$x(t)=s(t)*\omega(t)+e(t) \quad (3)$$

其中 $s(t)$ 为记录的震源组合远场子波, 采用震源子波反褶积方法既公式(4)求取去气泡因子 $a(t)$ 。

$$\begin{bmatrix} r_{xx}(0) & r_{xx}(1) & \cdots & r_{xx}(m) \\ r_{xx}(1) & r_{xx}(0) & \cdots & r_{xx}(m-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{xx}(m) & r_{xx}(m-1) & \cdots & r_{xx}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(0) \\ a(1) \\ \cdots \\ a(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx}(n) \\ r_{xx}(n+1) \\ \cdots \\ r_{xx}(n+m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

经过反褶压制气泡效应后, 子波的频谱得到明显改善, 见图 6。这样得到的子波可以采用公式(5)来求取整形算子 $c(t)$ 。

$$\begin{bmatrix} (1+\lambda)r_{bb}(0) & r_{bb}(1) & \cdots & r_{bb}(m) \\ r_{bb}(1) & (1+\lambda)r_{bb}(0) & \cdots & r_{bb}(m-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{bb}(m) & r_{bb}(m-1) & \cdots & (1+\lambda)r_{bb}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(0) \\ c(1) \\ \cdots \\ c(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(0) \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 r_{bb} 为输入子波的自相关函数, m 为自相关函数的长度, $c(t)$ 为待求的整形算子。

这样最终的零相位化算子可以由上面两个算子得到:

$$f(\tau)=a(t)*c(t) \quad (6)$$

将 $f(\tau)$ 与地震记录 $x(t)$ 褶积, 得到零相位化后的地震记录。

2.2 整形算子求取

海洋地震资料中, 由于震源激发和电缆检波器均在海面以下, 容易产生虚反射。由于海水与空气形成了反射系数近似为-1 的自由表面, 因此检波点除了接收由震源激发, 并经过地层反射, 直达检波点的一次反射波(图 10a)以外, 还会接收到伴随在一次反射波后面的三种干扰波(图 10b、图 10c、图 10d)。图 10b 为先经过海面再经过地层接收到的虚反射, 图 10c 为先经过地层再经过海面接收到的虚反射, 图 10d 为先经过海面再经过地层然后又经过海面接收到的虚反射。本文与垂直观测系统同时采集的拖缆数据震源深度和电缆深度均为 5 m, 这就使得震源激发的虚反射与电缆检波器接收的虚反射叠加在一起。理论模型试算效果见图 11。图 11a 为反射系数序列, 图 11b 为受虚反射影响反射系数序列, 图 11c 为雷克子波与受虚反射影响反射系数序列褶积得到合成地震记录, 图 11d 和图 11e 分别为合成地震记录零相位化和压制虚反射后结果, 图 11g 为压制虚反射前后频谱。

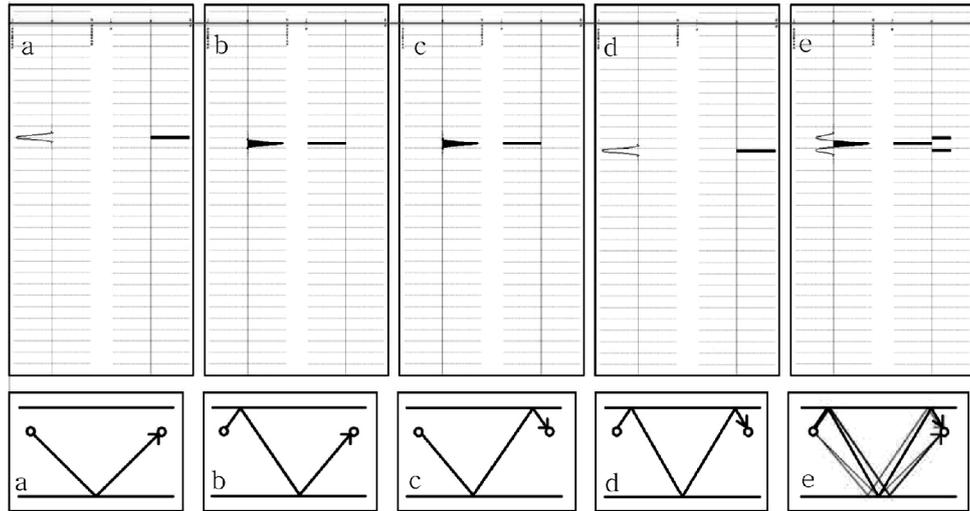


图 10 检波器接收虚反射物理过程

Fig.10 Physical procedures of ghost received by detector

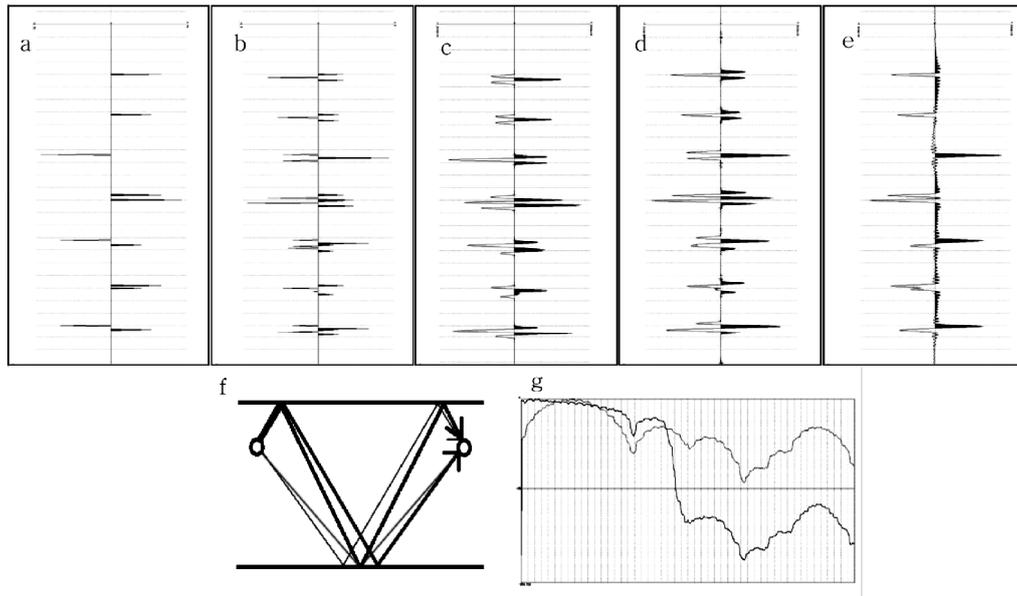


图 11 合成地震记录零相位化及压制虚反射结果

Fig.11 De-ghost and zero phase result by synthetic seismogram

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的琼东南盆地，琼东南盆地存在多个生烃凹陷，该盆地已证实是我国近海大型含气区之一。图 12 是远场子波零相位化(压制气泡算子、零相位算子、压制虚反射算子)前后效果，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。

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。利用本文的 OBS 模拟垂直观测系统提取远场子波处理技术可以基本消除虚反射和气泡效应影响，同时子波整形为零相位。该方法获得的零相位资料相位稳定、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。但该方法仍然残留部分虚反射，值得今后进一步研究。

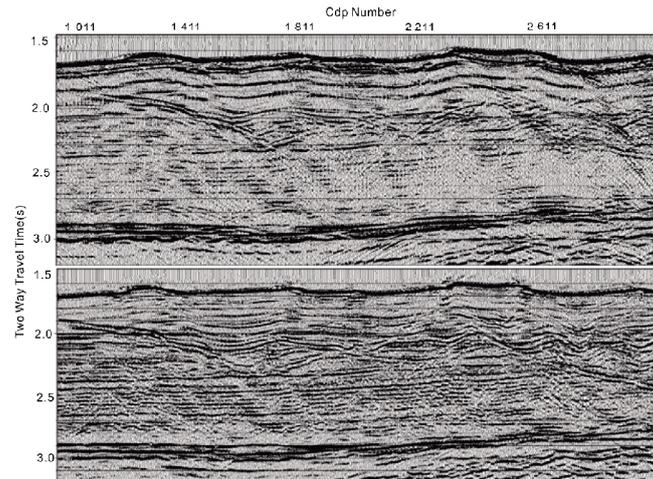


图 12 压制虚反射和零相位化前 (上)、后 (下) 叠加剖面

Fig.12 The overlay profiles of far-field wavelet before and after the de bubble and ghost

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: 57-100.
- [2] 伊尔马滋·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: 122-178.
- [3] 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(S1): 192-194.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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(S2): 121-124.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1-189.
- [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] Landro M. Modeling of GI gun signatures [J]. Geophysics Prospecting, 1992, 40(7): 721-747.
- [15] Chen H L, Ni C Z. Simulation and application of far-field wavelet for air gun array [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2008, 43(6): 623-625.
- [16] Keller J B, Kolodner I I. Damping of underwater explosion bubble oscillations [J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(10): 1 152-1 161.
- [17] Ziolkowski A, Parks G, Hatton L, et al. The signature of an air-gun array: computation from near-field measurements including interactions [J]. Geophysics, 1982, 47 (10): 1 413-1 421.
- [18] Ziolkowski A, Johnston J. Computation of far-field air gun signatures from gun-mounted pressure measurements[J]. Expanded Abstracts of 66th Annual Internat SEG Mtg, 1996: 13-16.
- [19] Johnson D T. Understanding air-gun bubble behavior[J]. Geophysics, 1994, 59(11): 1 729-1 734.
- [20] Ziolkowski A. Measurement of air-gun bubble oscillations [J]. Geophysics, 1998, 63(6): 2 009-2 024.
- [21] 赵波, 俞寿朋, 聂勋碧, 等. 谱模拟反褶积方法及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1): 102-116.
- [22] 郭向宇, 周兴元, 董敏煜. 混合相位子波的相位估算及校正[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(2): 214-221.
- [23] 梁光河. 地震子波提取方法研究[J]. 石油物探, 1998, 37(1): 31-39.
- [24] 杨培杰, 印兴耀. 地震子波提取方法综述[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 123-127.
- [25] 李大卫. 基于高阶统计的混合相位子波估计及其处理[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(2): 117-121.
- [26] 李国发, 牟永光, 王濮. 交互地震子波提取技术[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(5): 33-36.
- [27] 王守君, 王征. 海上地震资料零相位化处理技术研究[J]. 石油物探, 2012, 51(4): 402-407.
- [28] 黄建宇, 伍忠良, 王伟巍, 等. 天然气水合物垂直缆地震系统关键技术技术与试验 [J]. 新能源进展, 2016, 4(3): 219-224.
- [29] 何勇, 张建中. 海洋地震垂直缆观测系统的射线照明分析[J]. CT理论与应用研究, 2015, 24(5): 689-700.
- [30] 陈金海, 周国良, 徐金祥. 虚反射和海水鸣震干扰的消除[J]. 海洋石油, 2000, 3(2): 29-34.