文章编号：1004—5589（2016）04—1109—10

干涉波场重建衰减OBC层间多次波

冯飞[1]，程耀[1]，焦旭明[1]，程浩[2]，王德利[2]

1. 中海油田服务股份有限公司 物探事业部物探研究院，天津 300451；
2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要： 由于OBC（ocean bottom cable）数据的采集方式为接收电缆铺设在海底，炮点在海面，常规的层间多次波压制方法不再适用，这给实际数据的处理带来了巨大的困难。本文利用地震波场干涉重建方法，对采集到的OBC数据进行波场重建，得到炮点和检波点都位于海底的虚拟炮集记录，与常规的在地表激发、地表接收的炮集一样，把OBC数据的层间多次波转化成常规的表面相关多次波和层间多次波，再进行预测。将其结果与共聚焦点（CFP）边界算法去除层间多次波的结果进行了对比，体现干涉重建技术在OBC数据层间多次波预测方面的准确性。

关键词： OBC；层间多次波；干涉重建；虚拟炮集；CFP

中图分类号： P631.413；P631.442 **文献标识码：** A **doi：** 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.04.022

Interferometry wave-field reconstruction method in internal multiples elimination of OBC data

FENG Fei[1], CHENG Yao[1], JIAO Xu-ming[1], CHENG Hao[2], WANG De-li[2]

1. Geophysical Research Institute of GEO-COSL, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China;
2. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: The conventional internal multiples elimination method can not be applied in the OBC data because receivers are at the bottom while the sources are at the surface of the sea, which makes the practical marine seismic data processing face with great challenge. In this paper, we get the virtual shot records with the virtual source and receivers at the bottom of the sea by reconstructing the OBC data, using seismic interferometry. The results are the same as conventional seismic data with the source and receivers at surface, which can convert the internal multiples of the OBC data to conventional surface-related multiples and internal multiples. Comparing with the results of CFP method, we can conclude that the seismic interferometry wave-filed reconstruction method can be applied well in internal multiples elimination of OBC data.

Key words: OBC; internal multiple; interferometry reconstruction; virtual shot record; CFP

0 引言

OBC（ocean bottom cable，简称OBC）海底电缆地震勘探系统[1]是近十几年发展起来的海上地震采集观测系统。它的观测系统和常规的海上拖缆地震勘探系统不同，常规的海上拖缆地震勘探采集系统为激发和接收都在海表面，而OBC数据的采集系统则为震源船在海表面匀速前进，等间距激

收稿日期：2016-01-05；改回日期：2016-07-07
基金项目：国家科技重大专项（2011ZX05023-005-008）和国家自然科学基金项目（41374108）联合资助.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发，接收电缆铺设在海底来采集数据。这样的观测系统，可以大大地提高海底地震采集数据的质量，对于地下地质构造的成像非常有利。

由于 OBC 数据采集观测系统中激发和接收不在同一平面，这样就会造成地震波的传播路径不对称[2,3]。海上常规的静校正是在高程相差较小时，忽略速度场偏差；而在 OBC 数据采集中，激发和接收的高程相差较大时，运用静校正会造成较大的速度场偏差，对后续处理带来较大的影响。常规拖缆的多次波衰减方法较难去除 OBC 数据中的多次波。其中 OBC 地震记录存在大量鬼波，为了消除鬼波的影响，前人发展了 OBC 采集双检波器技术[4-9]。这种技术是将压力检波器和垂直陆上检波器同时置于海底进行数据的采集，这两种检波器记录的鬼波具有极性相反的特点，所以将这两种记录进行有效的叠加，可以较好地压制鬼波。马继涛等[10]利用改进的 SRME（surface related multiple elimination）方法也对鬼波进行了压制。OBC 数据中不仅包含与海表面相关的表面多次波与鬼波，同样存在层间多次波。使用常规拖缆的层间多次波压制方法[11]，无法去除 OBC 数据的层间多次波。目前对 OBC 数据层间多次波衰减的研究比较少。

波场干涉技术是近年来发展起来的热点，利用地震数据进行近地表成像，刻画和监测，通常依赖于宏观速度模型。错误的速度信息将会导致地震图像中储层等的错误定位。如果地下的某层是强反射层或某些复杂的层，地震波将会受到强烈的扭曲，这就为地震处理带来了巨大的困难。Bakulin 和 Calvert[12]为克服这些困难，将地震检波器放置在一个水平井中，这个水平井位于复杂覆盖层之下。虽然地震震源放置在地表，但是它们能够被重建到接收层，在同一深度形成一个虚拟炮排列[13,14]。实际上，地表到水平井之间的传播响应已经进行了记录，但是，无需知道传播速度，也能够实现干涉重建。图 1 对干涉重建技术进行了示意性的解释。震源在地表设置在 S 处，复杂覆盖层之上。检波器均匀设置在水平井中，复杂覆盖层之下，目标体之上。利用水平井中的地震记录，进行干涉重建，可以得到在 A 点激发，B 点接收的虚拟炮记录。干涉重建与地表的检波器 C 无关。这样得到的虚拟炮集记录，能更好地反应目标体的特点和形态。

本文对 OBC 数据采集系统和干涉重建技术的特点进行分析，针对 OBC 数据的层间多次波衰减问题进行研究。图 2 利用干涉重建方法，对 OBC 数据进行波场重建，使炮点和检波点同时位于海底，在同一界面上，形成一个新的炮集记录—虚拟炮集记录。这样的记录和常规的地表放炮地表接收的炮集记录一样，只不过形成虚拟炮集的界面在海底。通过干涉重建处理，将 OBC 数据的层间多次波变成虚拟炮集记录中的表面相关多次波和层间多次波。再用常规的多次波估计方法进行处理，并与 CFP 边界算法去除层间多次波进行对比，从而体现出波场干涉重建技术衰减 OBC 层间多次波的准确性。

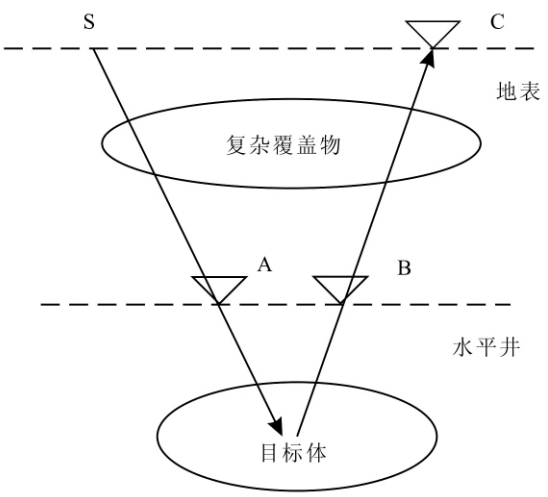


图 1 波场重建示意图

Fig. 1 Diagram of Wave-Field reconstruction

1 基本理论

本文给出干涉重建波场的主要理论以及多次波衰减原理。通过格林函数推导褶积型的互易定理和相关型的互易定理[15]。

1.1 褶积型互易定理

在频率域，3D Helmholtz 方程，通过格林函数，可以表示成:

$$(\nabla^2 + k^2)\, G(g \mid s) = -\delta(s - g) \qquad (1)$$

(1) 式中: $G(g \mid s)$ 为波场在 g 点接收，s 点激发。

对于图 3a，Helmholtz 方程可以定义为:

$$(\nabla^2 + k^2)\, G(x \mid A) = -\delta(x - A) \qquad (2)$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

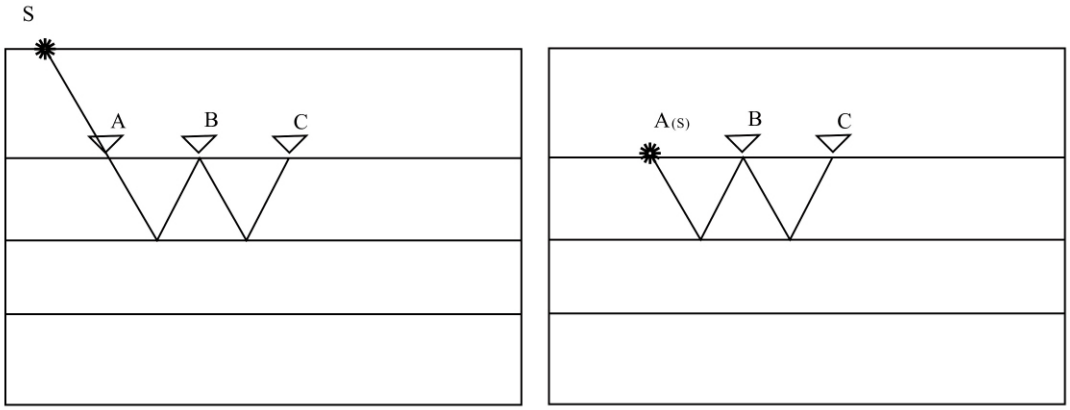


图 2　OBC 数据干涉重建示意图

Fig. 2　Diagram of interferometry reconstruction of OBC data

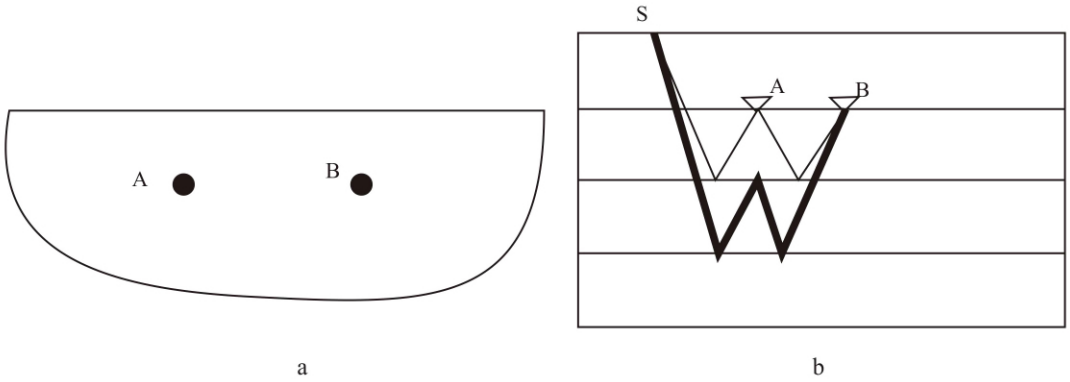


图 3　互易定理示意图

Fig. 3　Diagram of reciprocity theorem

$$(\nabla^2 + k_0^2)\, G_0(x \mid B) = -\delta(x - B) \qquad (3)$$

通过推导得到褶积型互易定理:

$$G(B \mid A) - G_0(A \mid B) = \int_s \left[G_0(x \mid B)\, \frac{\partial G(x \mid A)}{\partial n_x} - G(x \mid A)\, \frac{\partial G_0(x \mid B)}{\partial n_x}\right] \mathrm{d}^2 x \qquad (4)$$

1.2　相关型互易定理

相关型互易定理的推导过程和褶积型的非常相似。对于图 3，定义 Helmholtz 方程为:

$$(\nabla^2 + k^2)\, G(x \mid A) = -\delta(x - A) \qquad (5)$$

$$(\nabla^2 + k^2)\, G(x \mid B)^* = -\delta(x - B) \qquad (6)$$

(6) 式中，* 代表复杂的共轭计算。通过推导得到相关型互易定理:

$$G(B \mid A) - G(A \mid B)^* = \int_s \left[G(x \mid B)^*\, \frac{\partial\, G(x \mid A)}{\partial\, n_x} - G(x \mid A)\, \frac{\partial\, G(x \mid B)^*}{\partial\, n_x}\right] \mathrm{d}^2 x \qquad (7)$$

(7) 式中，A 点和 B 点不在边界上的时候，$\frac{\partial\, G(x \mid B)^*}{\partial\, n_x} = \hat{n} \cdot \nabla G(x \mid B)^*$ 。

针对目标区域的相关型互易方程可以写成:

$$2i\mathrm{lm}\left[G(B \mid A)\right] = \int \left[G(B \mid x)^*\, \frac{\partial\, G(A \mid x)}{\partial\, n_x} - G(A \mid x)\, \frac{\partial\, G(B \mid x)^*}{\partial\, n_x}\right] \mathrm{d}^2 x \qquad (8)$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对（8）式进行远场近似:

$$2i\mathrm{lm}\left[G(B/A)\right] \approx 2\int_{S_0} G(B\mid x)^{*}\ \frac{\partial\ G(A\mid x)}{\partial\ n_x}\mathrm{d}^2x \approx 2ik\int_{S_0} G(B\mid x)^{*}\ G(A\mid x)\ \mathrm{d}^2x \tag{9}$$

通过稳相方法来分析相关互易方程的物理意义。假设 $G(A\mid x)$ 和 $G(B\mid x)$ 近似代表直达波和上行反射之和，则

$$G(B\mid x)^{*} = \frac{W(\omega)^{*}}{4\pi}\left[\frac{\overbrace{e^{-i\omega(\tau_{xB}+\tau^{static})}}^{D_B^{*}=direct}}{v_{\tau_{xB}}} + \frac{\overbrace{r_B e^{-i\omega(\tau_{x\{OHO\}mB}+\tau^{static})}}^{R_B^{*}=reflection}}{v_{\tau_{x\{OHO\}mB}}}\right] \tag{10}$$

$$\frac{\partial\ G(A\mid x)}{\partial\ n_x} = \frac{iW(\omega)\,\omega}{4\pi v}\left[\frac{\overbrace{e^{i\omega(\tau_{xA}+\tau^{static})}}^{D_A=direct}}{v_{\tau_{xA}}}\cos\theta_{xA} + \frac{\overbrace{r_A e^{i\omega(\tau_{x\{OHO\}mA}+\tau^{static})}}^{R_A=reflection}}{v_{\tau_{x\{OHO\}mA}}}\cos\theta_{x\{OHO\}mA}\right] \tag{11}$$

（11）式中: r_B 为反射层的反射系数; θ 为传播角度; τ 为传播路径; τ^{static} 包含了激发时间和近地表残余静校正等未知信息; $\tau_{x\{OHO\}mA}$ 代表了所有的上行反射，$m=0$ 的时候表示一次反射波，$m\neq 0$ 的时候表示层间多次波的阶数; $H\geqslant R$，R 表示检波器所在层面，$H=R$ 表示与海底有关的层间多次波，$H>R$ 表示与深层有关的层间多次波; {OHO} 表示在 O 层和 H 层之间产生层间多次波。

假设积分边界与反射层足够远，这样 $\cos\theta$ 的值就可以近似为 1，进行线性积分可得

$$2\int_{S_0+S\infty} G(B\mid x)^{*}\ \frac{\partial\ G(x\mid A)}{\partial\ n_x}\mathrm{d}x = \frac{2i\omega\mid W(\omega)\mid^2}{(4\pi)^2 v}\int_{S_0+S\infty}\left[\frac{\overbrace{e^{-i\omega(\tau_{xB}-\tau_{xA})}}^{D_B^{*}D_A}}{v^2_{\tau_{xB}\tau_{xA}}} + \frac{\overbrace{r_A e^{-i\omega(\tau_{xB}-\tau_{x\{OHO\}mA})}}^{D_B^{*}R_A}}{v^2_{\tau_{xB}\tau_{x\{OHO\}mA}}} + \frac{\overbrace{r_B e^{-i\omega(\tau_{x\{OHO\}mB}-\tau_{xA})}}^{R_B^{*}D_A}}{v^2_{\tau_{x\{OHO\}mB}\tau_{xA}}} + \frac{\overbrace{r_A r_B e^{-i\omega(\tau_{x\{OHO\}mB}-\tau_{x\{OHO\}mA})}}^{R_B^{*}R_A}}{v^2_{\tau_{x\{OHO\}mB}\tau_{x\{OHO\}mA}}}\right]\mathrm{d}x \tag{12}$$

（12）式中: 忽略 $R_B^{*}R_A$ 项，对于积分体的非对称激发采用高频限制，就可以给出简单相点的稳相公式

$$\mathrm{lm}\left[G(B\mid A)\right] \sim \frac{\omega\mid W(\omega)\mid^2}{(4\pi)^2 v}\left[\overbrace{\alpha e^{i\omega\tau_{AB}}+\beta e^{-i\omega\tau_{AB}}}^{direct} + \overbrace{\alpha' e^{i\omega\tau_{A\{OHO\}mB}}+\beta' e^{-i\omega\tau_{A\{OHO\}mB}}}^{reflection}\right] \tag{13}$$

（13）式中: $\alpha,\alpha',\beta,\beta'$ 为复杂的系数，包含了几何扩散和反射系数影响。这个结果说明了互易方程重建直达波和反射波的运动学特性。其中，α,α' 相关项表示物理可实现部分，β,β' 表示物理不可实现部分。

那么，对于图 2 中的 OBC 观测系统来说，x 点激发，A 点接收的波场可以表示为 $G(A\mid x)$，B 点接收的波场可以表示为 $G(B\mid x)$，将两点接收到的波场进行相关作用，在频率域就可以得到（14）式:

$$2i\mathrm{lm}\left[G(B\mid A)\right] = \int\left[G(B\mid x)^{*}\ \frac{\partial\ G(A\mid x)}{\partial\ n_x} - G(A\mid x)\ \frac{\partial\ G(B\mid x)^{*}}{\partial\ n_x}\right]\mathrm{d}^2x \tag{14}$$

原始 OBC 数据的层间多次波包含两部分，如图 3b 所示，一部分为与海底有关的层间多次波，一部分为除海底之外的深层层间多次波，可用下式表示

$$M_{OBC} = \frac{W(\omega)}{4\pi}\left[\sum\frac{\overbrace{r_R^{n}e^{-i\omega(\tau_{x\{ORO\}nR}+\tau^{static})}}^{与海底表面相关的层间多次波}}{v_{x\{ORO\}nR}} + \sum\frac{\overbrace{r_R^{m}e^{-i\omega(\tau_{x\{OhO\}mR}+\tau^{static})}}^{深层层间多次波}}{v_{\tau_{x\{OhO\}mR}}}\right] \tag{15}$$

（15）式中: R 代表检波器所在层，也就是海底; O 为反射层; $h>R$ 为深层界面; $n>0$ 代表与海底表面相关的层间多次波的阶数; $m>0$ 代表深层层间多次波的阶数，{OhO} 表示在 O 层和 h 层之间产生层间多次波。经过相关作用以后，原始 OBC 数据的层间多次波，转化成了虚拟炮记录中的表面相关多次波和层间多次波，得下式

$$M_{vs} \sim \frac{\omega\mid W(\omega)\mid^2}{(4\pi)^2 v}\left[\sum ae^{-i\omega(\tau_{ROR}+n\tau_{ROR})}\right]^{虚拟炮的表面相关多次波} + \overbrace{\sum be^{-i\omega\tau_{R\{OhO\}mR}}}^{虚拟炮的层间多次波}\Big] \tag{16}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于是，海表面激发海底接收的数据，转化为海底激发海底接收的炮集记录，运用常规的 SRME 方法就能估计出与海底有关的表面多次波。

1.3 SRME 基本原理

表面相关多次波衰减（surface related multiple elimination，简称 SRME）是由 Berkhout 和 Verschuur 等人[16]相继提出的。该方法基于波动方程，属于完全数据驱动型，不需要知道地下的任何先验或者后验信息，利用叠前数据来估计地表相关多次波。检波器接收到的表面相关多次波，都可以看做是由若干个一次反射波构成的。将原始数据与自身进行时空域褶积，时间方向上的褶积可以得到预测出来的多次波的传播时间，空间方向上的褶积可以得到预测出来的多次波的偏移距，这样就可以预测出与自由表面相关的多次波。

自由界面 z_0 处实际测得的波场可以表示为:

$$P(z_0) = D^-(z_0) X_0(z_0, z_0) [S^+(z_0) + R^{\wedge}(z_0) P^-(z_0)] \tag{17}$$

(17) 式中，$D^-(z_0)$ 为检波器算子; 算子 $X_0(z_0, z_0)$ 代表地下界面的传递函数; $S^+(z_0)$ 定义为在观测面 z_0 处的下行震源波场; $R^{\wedge}(z_0) P^-(z_0)$ 为自由表面反射回地下的波场，其中 $R^{\wedge}(z_0)$ 代表自由界面下行反射算子，$P^-(z_0)$ 为自由表面 z_0 处总的上行波场。

由方程 (17)，可以得到:

$$P(z_0) = P_0(z_0) + M_0(z_0) \tag{18}$$

其中，

$$P_0(z_0) = D^-(z_0) X_0(z_0, z_0) S^+(z_0) \tag{19}$$

$$M_0(z_0) = D^-(z_0) X_0(z_0, z_0) [R^{\wedge}(z_0) P^-(z_0)] \tag{20}$$

$P_0(z_0)$ 表示一次波响应，$M_0(z_0)$ 表示多次波响应。

由此，可以得到多次波衰减的迭代公式为:

$$\begin{cases} P_0^{(n+1)} = P - P_0^{(n)} AP \\ P_0^{(0)} = P \end{cases} \tag{21}$$

(21) 式中，$A(z_0, z_0) = S^{-1}(z_0) R^{\wedge}(z_0, z_0) D^{-1}(z_0) \approx -[D(z_0) S(z_0)]^{-1}$。

1.4 时移处理

假设海底界面用 z_1 表示，虚拟炮集记录的表面相关多次波可以表示成 $M_{VS}(z_1, z_1)$，水层传播算子可以表示为 $F(z_0, z_1)$，那么 OBC 数据的层间多次波在频率域可以表示为:

$$M_{OBC}(z_0, z_1) = F(z_0, z_1) M_{VS}(z_1, z_1) \tag{22}$$

这样预测的 $M_{OBC}(z_0, z_1)$，在时间和位置上都与 OBC 数据中所含的层间多次波一致，再进行匹配减去，可以将层间多次波从 OBC 数据中衰减。

为验证干涉重建技术在预测 OBC 层间多次波的准确性，与共聚焦点（CFP）边界算法衰减 OBC 数据的层间多次波进行比较。

1.5 CFP 边界算法

共聚焦点 CFP（common focus point，简称 CFP）技术[17]，1982 年由 Berkhout[18,19] 提出。他认为可以用“聚焦”的概念来代替“反射”的概念。“聚焦”被看做是面向目标波场合成的特殊形式。如果上行波场和下行波场同样使用这一概念，那么地震偏移方程用两步连续的数值聚焦（激发聚焦和检波聚焦）就可以重新表述:

第一步聚焦:

$$\Delta P_j^+(z_m, z_0) = F_j^+(z_m, z_0) \Delta P(z_0, z_0) \tag{23}$$

(23) 式中: $F_j^+(z_m, z_0)$ 为聚焦算子，它表示聚焦点激发、地表对应接收点位置接收的时距关系。这样就可以把一个炮记录转换为位于震源处的单一的一道，对所有的炮记录做这样的运算，并把所有的道集中起来就得到了这个网格点的 CFP 道集。

第二步聚焦:

$$\Delta P_{jj}(z_m, z_m) = [F_j^+(z_m, z_0) \Delta P(z_0, z_0)] F_j(z_0, z_m) \tag{24}$$

(24) 式中: $F_j(z_0, z_m)$ 是网格点 (x_j, z_m) 的聚焦算子，标量 $\Delta P_{jj}(z_m, z_m)$ 是网格点地震道的一个频率分量。选择适当的 $F_j(z_0, z_m)$，可以得到这个网格点的网格点道集。

SRME 方法可以推广到层间多次波的去除上。在去除相对较强的表面多次波之后，对于层间多次波来说，用分界面 z_n 代替自由界面 z_0，就可以将

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

多次波表达式写成如下形式:

模型驱动:

$$\{\delta M_j(z_0,z_0)\}_n = F_{pr}(z_0,z_n)\{\bar{P}_j^-(z_n,z_0)\}_{n-1} \quad (25)$$

$$F_{pr}(z_0,z_n) = D(z_0)\Delta X(z_0,z_n)R^*(z_n,z_n) \quad (26)$$

数据驱动:

$$\{\delta M_j(z_0,z_0)\}_n = F_{pr}(z_0,z_n)\{\bar{P}_j(z_n,z_0)\}_{n-1} \quad (27)$$

$$F_{pr}(z_0,z_n) = \{\bar{P}(z_0,z_n)\}_n A(z_n,z_n) \quad (28)$$

(28) 式中: $\Delta X(z_0,z_n)$ 为传递函数, $F_{pr}(z_0,z_n)$ 为预测算子。上式即为去除层间多次波的边界算法。

2 数值模拟

图 4 为用一个简单的四层地质模型进行试算。第一层设置为水层,速度为 1 500 m/s,往下依次为 2 000 m/s、3 000 m/s、2 500 m/s 的地层。将炮点设置于水层顶面,检波器设置于水层底面,共 250 道,来模拟 OBC 数据采集的观测系统。正演模拟的时候,采用检波点固定、炮点等间距移动的方式,表面设置为吸收表面,得到的 OBC 数据不含有与水层表面相关的表面多次波,只含有一次波和层间多次波。

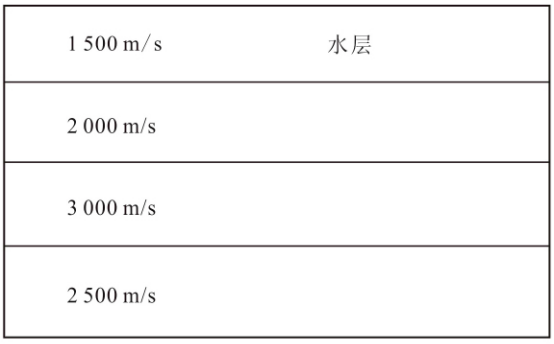


图 4 模型示意图

Fig. 4 Diagram of model

如图 5 所示,除了反映层界面的一次波外,在 1.5 s 位置附近还出现了层界面之间的层间多次波。经过对传播时间的分析可知,1.5 s 处的层间多次波产生于 2 000 m/s 的速度层中。之后对得到的 OBC 数据进行干涉重建方法处理。将道与道之间进行互相关作用,与自身进行相关的检波点位置作为虚拟炮集的炮点位置,与其他道相关的检波点位置作为虚拟炮集的检波点位置,这样就形成了一个新的炮集记录—虚拟炮集记录 (图 6)。对图 6 进行分析可知,水层这段传播距离被去除,OBC 数据的整个时间轴被上移,第一个反射波,在虚拟炮集记录中,变成了直达波,其他的反射波记录在时间上都被提前,因为整个记录在传播距离上减短了,减短的传播路程如图 7 所示。OBC 数据的层间多次波,在虚拟炮集记录中变成了表面相关多次波和层间多次波 (图 6),图 5 中 1.5 s 附近的层间多次波,在图 6 中变成了 1 s 附近的表面相关多次波。

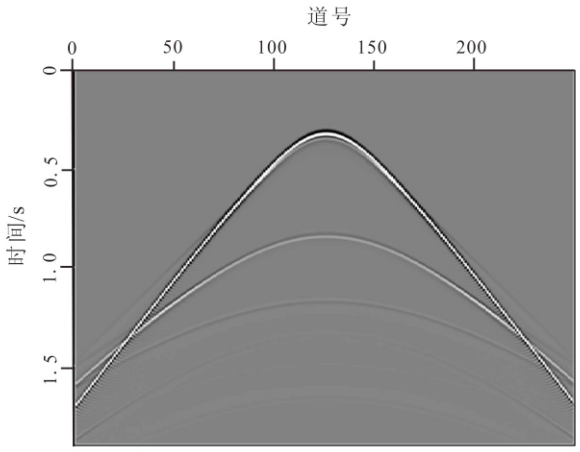


图 5 OBC 数据单炮记录

Fig. 5 Single shot of OBC data

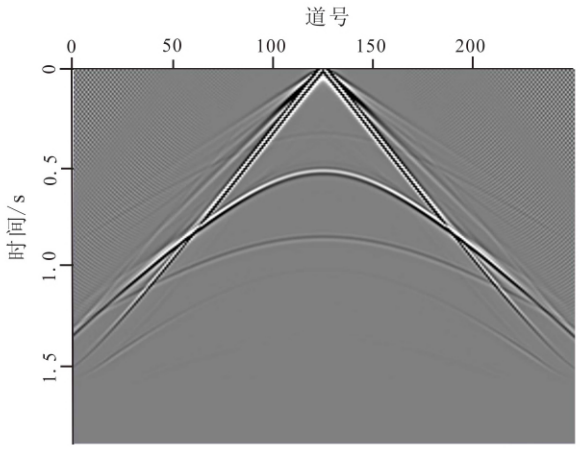


图 6 虚拟炮集单炮记录

Fig. 6 Single shot of virtual shots

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

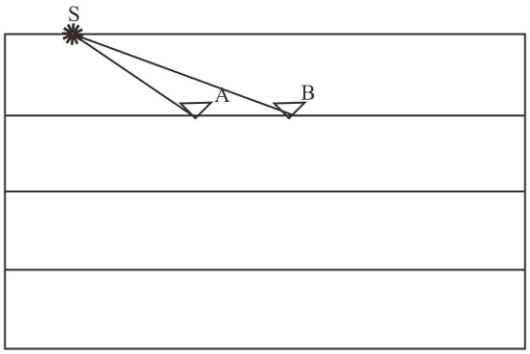


图 7　OBC 数据波场传播示意图

Fig. 7　Diagram of wave-field propagation for OBC data

通过波场重建形成的虚拟炮集记录，和常规的地表放炮地表接收的炮集记录一样，可以用常规的多次波压制方法对虚拟炮集记录中的多次波进行处理。本文利用常规的 SRME 方法对虚拟炮集记录进行表面相关多次波的预测，得到了表面相关多次波(图 8)。在时间和位置上与图 6 中的表面多次波相一致。图 8 中，1.5 s 下方出现的噪声是由于 SRME 预处理过程中，直达波与下界面一次反射波在两侧交叉重叠，直达波切除的不彻底造成的。

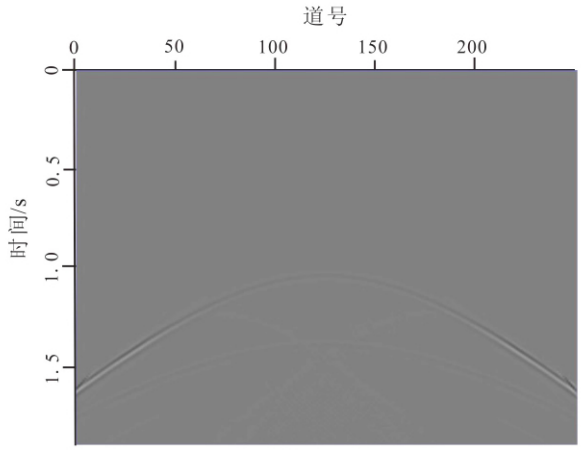


图 8　预测出来的虚拟炮集表面相关多次波

Fig. 8　Surface-related multiples estimated in virtual shot gather

对预测出来的虚拟炮集的表面相关多次波进行时移处理，使它与水层的传播算子进行褶积。传播算子是由一组单程走时和相应的振幅组成，相当于在海面激发，海底接收的单程炮记录。由于干涉重建而减短的传播时间又被加了回来，在时间和位置上与 OBC 数据的层间多次波对应上。图 9 通过上述处理，OBC 的层间多次波被预测出来。

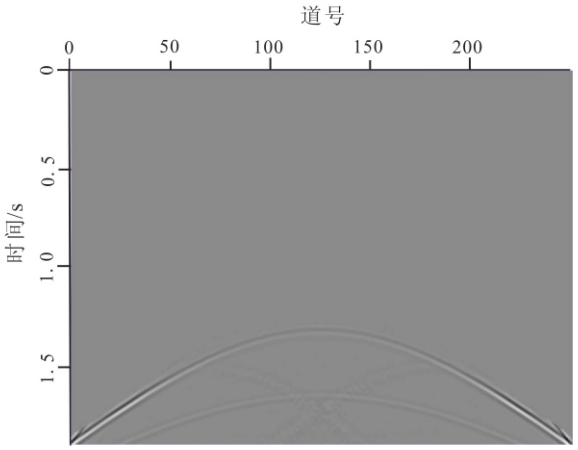


图 9　OBC 数据的层间多次波

Fig. 9　Internal multiples of OBC data

预测出来的多次波，通常与原始数据中的多次波在振幅和相位上都存在着一定的差异。运用常规的最小二乘匹配，分别进行子波和振幅的匹配，最后进行减去，可以把 OBC 数据的层间多次波去除，得到不含层间多次波的 OBC 数据（图 10）。

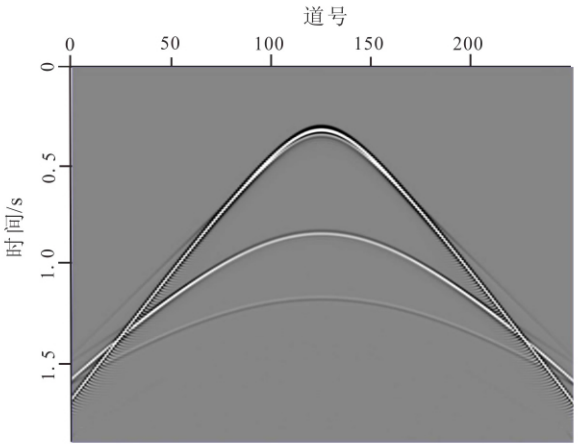


图 10　去除了层间多次波的 OBC 数据

Fig. 10　OBC data after removing internal multiples

同样，利用 CFP 边界算法对用图 4 模拟的 OBC 数据进行层间多次波的压制。选取一个目标界面。经过上述分析，1.5 s 处的多次波是在 2 000 m/s 的层中产生的，那么，目标界面应该选在 500 m 处的水层底界面。目标界面选定以后，在目标界面上按一定间隔确定聚焦点序列，对每个聚焦点计算聚焦算子（图 11）。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

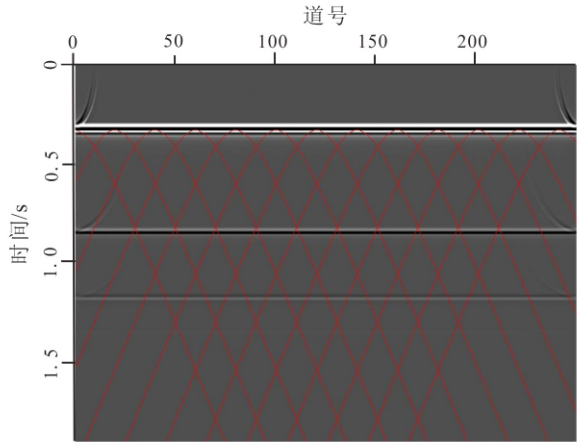


图 11 选取的目标界面示意图

Fig. 11 Diagram of selected target interface

利用得到的聚焦算子，构建 CFP 道集（图 12）。在用 CFP 道集进行层间多次波预测之前，需要将关于目标界面的一次波以及目标界面以上的一次波和多次波进行切除处理，这与 SRME 预测表面相关多次波时切除直达波是类似处理（图 13）。

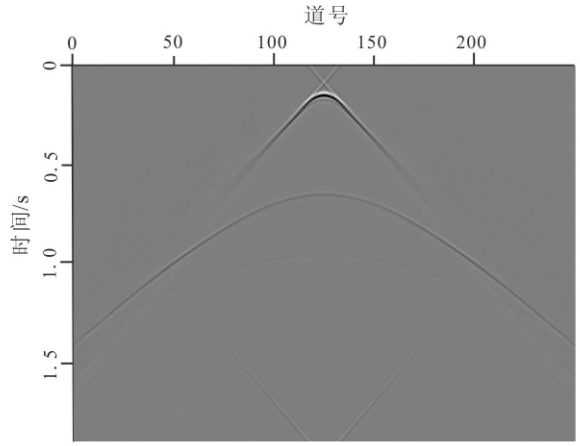


图 12 构建的 CFP 道集

Fig. 12 Constructed CFP gather

通过切除处理以后的 CFP 道集，能进行层间多次波的预测。对地下每个网格点对应的 CFP 道集进行褶积，地下网格点对于最终预测层间多次波的贡献可以计算出来。预测出来的层间多次波如图 14 所示。与原始 OBC 数据的记录进行对比，预测出的层间多次波在时间和位置上与原始记录中的层间多次波一致。运用最小二乘法进行匹配减去，得到不含层间多次波的 OBC 数据（图 15）。

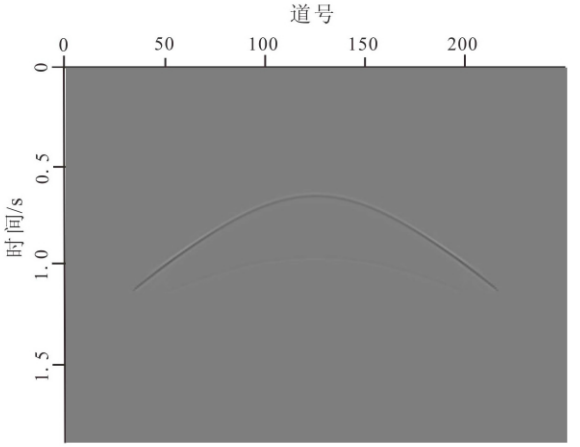


图 13 切除处理以后的 CFP 道

Fig. 13 CFP gather after removing

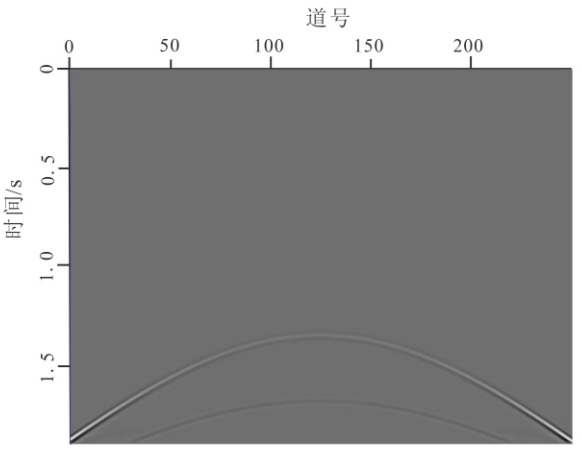


图 14 预测出来的层间多次波

Fig. 14 Estimated internal multiples

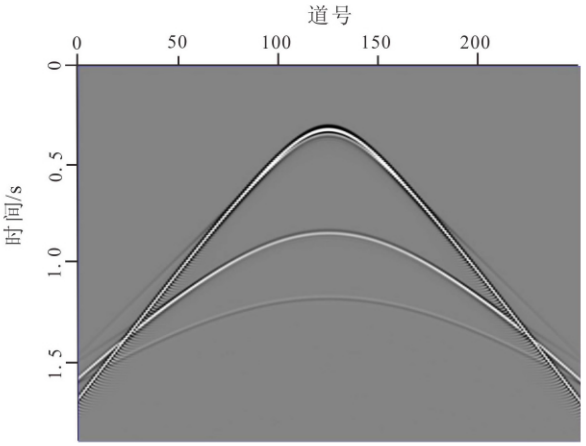
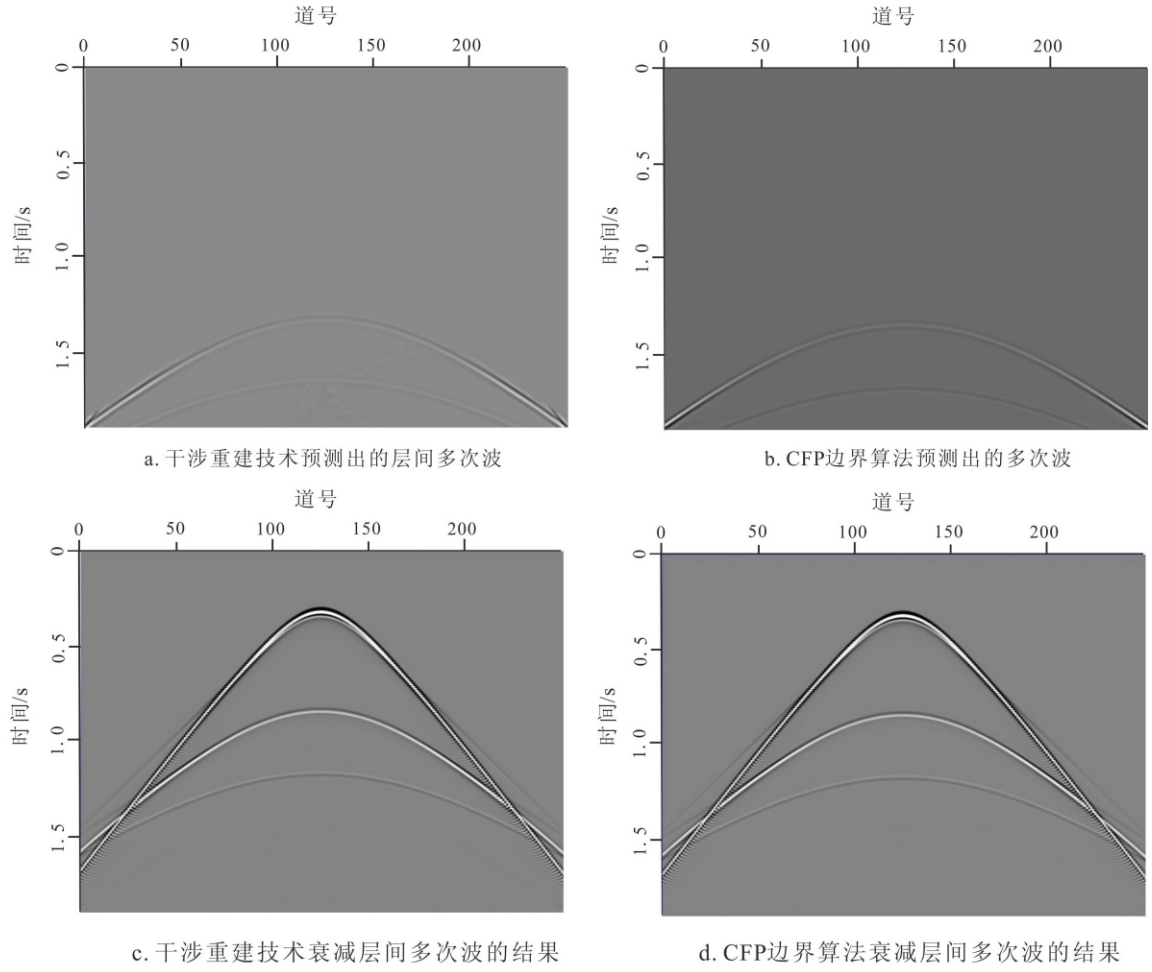


图 15 去除层间多次波的结果

Fig. 15 Result after removing internal multiples

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

将两种方法预测出的层间多次波和匹配减去的结果进行对比（图 16）。图 16a 和图 16b 分别为两种方法预测出来的层间多次波，在时间和位置上非常一致。图 16c 和图 16d 分别为匹配减去的结果，层间多次波都被从原始数据中去除，取得良好的效果，说明两种方法都能较好地衰减 OBC 数据的层间多次波。



a. 干涉重建技术预测出的层间多次波　　b. CFP边界算法预测出的多次波

c. 干涉重建技术衰减层间多次波的结果　　d. CFP边界算法衰减层间多次波的结果

图 16　两种方法的结果对比

Fig. 16　Comparison of two methods

但是，这两种方法在层间多次波的识别与预测上却存在着较大的差别。干涉重建技术，将 OBC 数据的层间多次波进行转化，变为虚拟炮集记录中的表面相关多次波和层间多次波。使 OBC 数据变成了一个海底放炮海底接收的常规观测系统下的地震记录。常规方法处理不了的 OBC 数据，转化成了常规的同一界面激发和接收的虚拟炮集记录。这样，虚拟炮集记录的表面多次波，就可以用表面多次波的特点来进行识别与估计；虚拟炮集记录的层间多次波，具有了常规多次波的特点，就可以用常规的层间多次波估计方法进行估计。而 CFP 边界算法，则需要直接对 OBC 数据的层间多次波进行识别，判断目标界面来进行层间多次波的预测。在实际数据处理中，由于地质情况的复杂性，很难判断哪些是层间多次波，这就给层间多次波的估计带来了困难。

3　结论

（1）干涉重建技术将 OBC 数据的层间多次波转化成虚拟炮集记录中的表面相关多次波和层间多次波进行处理。然后将转化出的层间多次波采用常规的匹配减去法将 OBC 数据中的层间多次波衰减。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

该方法直接对产生层间多次波的目的层位进行识别，更加体现数据驱动不需要先验信息的优势。在实际OBC数据处理中，由于地质情况比较复杂，OBC数据观测系统还有其特殊性，对于层间多次波的识别十分困难。

(2) OBC地震勘探，以其数据精度高，反映的地下构造信息多，得到了大家的青睐。OBC数据层间多次波的去除，使得后续的处理变得容易，成像精度得到提高，解释更加准确。采用波场干涉重建技术应用在OBC去除层间多次波中，具有一定的实际意义。

参考文献:

[1] Hoffe B H, Lines L R, Cary P W. Application of OBC recording [J]. The Leading Edge, 2000, 19 (4): 382-391.

[2] 陈浩林，张保庆，倪成洲，等. 水深对OBC地震资料的影响分析与对策 [J]. 石油地球物理勘探，2010，45 (增刊1)：18-24.
CHEN Hao-lin, ZHANG Bao-qing, NI Cheng-zhou, et al. The analysis and strategy of influence of water depth to OBC data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45 (Suppl. 1): 18-24.

[3] 金丹，阎贫，唐群署，等. Kirchhoff波场延拓在OBC记录海水层基准面校正中的应用 [J]. 热带海洋学报，2011，30 (6)：84-89.
JIN Dan, YAN Pin, TANG Qun-shu, et al. Application of Kirchhoff integral wave field extrapolation to water layer datuming for OBC record [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30 (6): 84-89.

[4] Barr F J, Sanders J I. Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in a water-bottom cable [C] //Expanded Abstracts of the 59th Annual SEG Meeting, Denver, 1989: 653-656.

[5] Barr F J. System for attenuation of water-column reverberations [P]. US, US4979150. 1990.

[6] Barr F J, Chambers R E, Dragoset W, et al. A comparison of methods for combining dual-sensor ocean-bottom cable traces [C] //Expanded Abstracts of the 67th Annual SEG Meeting, Dallas, 1997: 67-70.

[7] Barr F J. Dual-sensor OBC technology [J]. The Leading Edge, 1997, 16 (1): 45-51.

[8] 郝振江，冯飞，王德利，等. Curvelet海底电缆多次波压制方法研究 [J]. 世界地质，2013，32 (1)：130-136.
HAO Zhen-jiang, FENG Fei, WANG De-li, et al. Research on OBC multiple wave attenuation method in Curvelet domain [J]. Global Geology, 2013, 32 (1): 130-136.

[9] 孙海龙，王德利，陈鑫，等. 基于波场延拓的多次波压制技术及其改进 [J]. 世界地质，2015，34 (1)：226-231.
SUN Hai-long, WANG De-li, CHEN Xin, et al. Method of wave field extrapolation and its improvement to remove multiples [J]. Global Geology, 2015, 34 (1): 226-231.

[10] 马继涛，Sen M K，陈小宏，等. 海底电缆多次波压制方法研究 [J]. 地球物理学报，2011，54 (11)：2960-2966.
MA Ji-tao, Sen M K, CHEN Xiao-hong, et al. OBC multiples attenuation technique using SRME theory [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (11): 2960-2966.

[11] 王德利，党丹，刘伟明. CFP技术层间多次波预测及Curvelet域相减方法 [J]. 吉林大学学报：地球科学版，2011，41 (3)：907-914.
WANG De-li, DANG Dan, LIU Wei-ming. Internal multilples prediction based on CFP approach and curvelet domain subtraction [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41 (3): 907-914.

[12] Bakulin A, Calvert R. The virtual source method: theory and case study [J]. Geophysics, 2006, 71: 139-150.

[13] Mehta K, Snieder R. Virtual source gathers and attenuation of free-surface multiples using OBC data: implementation issues and a case study [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts, New Orleans, 2006: 2669-2673.

[14] Mehta K, Sheiman J. The virtual-source method applied to Mars field OBC data for time-lapse monitoring [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts, San Antonio, 2007: 2914-2918.

[15] 朱恒，王德利，时志安，等. 地震干涉技术被动源地震成像 [J]. 地球物理学进展，2012，27 (2)：496-502.
ZHU Heng, WANG De-li, SHI Zhi-an, et al. Passive seismic imaging of seismic interferometry [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27 (2): 496-502.

[16] Verschuur D J, Berkhout A J. Adaptive surface-related multiple elimination [J]. Geophysics, 1992, 57 (9): 1166-1177.

[17] Berkhout A J. Areal shot record technology [J]. Seismic Exploration, 1992, 1: 251-264.

[18] Berkhout A J. Pushing the limits of seismic imaging, part I: prestack migration in terms of double dynamic focusing [J]. Geophysics, 1997, 62 (3): 937-954.

[19] Berkhout A J. Pushing the limits of seismic imaging, part II: integration of prestack migration, velocity estimation, and AVO analysis [J]. Geophysics, 1997, 62 (3): 954-969.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net