文章编号：1004—5589（2018）01—0267—09

线性 Radon 域地震干涉层间多次波预测方法

孙宇，王德利，胡斌

吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要：为避免时空域地震干涉技术预测层间多次波过程中出现假象干扰，影响地震资料处理。笔者结合线性 Radon 变换与地震干涉技术，在线性 Radon 域中利用地震干涉技术预测层间多次波。通过数值模拟验证了线性 Radon 域地震干涉层间多次波预测方法的有效性，并将该方法应用到复杂速度模型中。结果表明，线性 Radon 域地震干涉技术可以有效减少时空域地震干涉技术预测层间多次波存在的假象，压缩数据体积大小，提高计算效率，并能够适用于复杂地质环境。

关键词：线性 Radon 域；层间多次波；数据驱动；地震干涉；压制假象

中图分类号：P631.443 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.025

Internal multiples prediction based on seismic interferometry in linear Radon domain

SUN Yu, WANG De-li, HU Bin

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: In order to avoid the spurious events in the internal multiples prediction based on seismic interferometry in time-space domain, which impact seismic data processing, the authors combine the linear Radon transform with seismic interferometry to predict internal multiples by seismic interferometry in linear Radon domain, of which the effectiveness has been verified through numerical simulation and the application of this method to complicated velocity model. The results show that internal multiples prediction based on seismic interferometry in linear Radon domain can suppress the spurious events in internal multiples prediction based on seismic interferometry in time-space domain, compress data to improve calculation efficiency, and is suitable for complicated geological environment.

Key words: linear Radon domain; internal multiples; data driven; seismic interferometry; suppress spurious event

0 引言

在地震勘探的实际工作中，多次波的存在严重影响提取一次波的效果，对后期的反演成像处理有很大影响。表面相关多次波已经有较为成熟的处理方法（如 SRME），但是由于实际地下构造的复杂性，某些地层会发育较强的层间多次波。常规的层间多次波预测方法大多是基于速度差异进行预测[1,2]，对深层层间多次波的适用性较差。Berkhout 等[3]基于 SRME 提出了共聚焦点道集（CFP）预测层间多次波算法，其重点在于对 CFP 算子的提取。Weglein 等[4,5]提出利用逆散射级数（ISS）

收稿日期：2017-09-11；**改回日期**：2017-11-28

基金项目：国家科技重大专项（2016ZX05026-002-003）及国家自然科学基金项目（41374108）联合资助.

通讯作者：王德利（1973-），男，教授，博士生导师，主要从事各向异性介质波场正、反演理论和高精度地震勘探研究. E-mail：wangdeli@jlu.edu.cn

的层间多次波压制算法，虽然不需要地下先验信息，但产生了高昂的计算量。

地震干涉技术由 Jon Claerbout 在 1968 年提出；2001 年，Schuster[8] 正式将此方法命名为“地震干涉技术”（Seismic interferometry）。近年来，地震干涉技术被广泛应用和改进，2012 年王德利、朱恒等人[9,10]通过数值模拟验证了被动源地震干涉的可行性。而 Radon 变换作为一种稀疏变换，在地震信号处理中已经得到了很多应用[11-13]。地震数据经过线性 Radon 变换后不仅数据体积得到了压缩，一些虚假信息也得到了压制[14,15]。2015 年，朱恒、王德利[16]将 Radon 变换与互相关算法相结合，在稀疏域中应用地震干涉技术，显著提高了虚拟地震记录的质量，证实线性 Radon 稀疏域地震干涉技术具有更好的有效性。

本文阐述了基于“稳相点”的线性 Radon 域地震干涉方法基本原理，通过地震干涉重建层间多次波场来说明时空域地震干涉与线性 Radon 域地震干涉进行层间多次波预测的原理。设计了理论模型说明了线性 Radon 域地震干涉技术对传统时空域干涉产生假象的压制。通过 pluto 模型来确定线性 Radon 域地震干涉预测层间多次波方法在复杂地质环境下的适用性。

1 线性 Radon 域地震干涉基本原理

地震干涉技术的基本思想是对两个不同位置检波器接收到的地震记录进行干涉运算，得到新的地震记录。其中相关型地震干涉在频率域表示为：

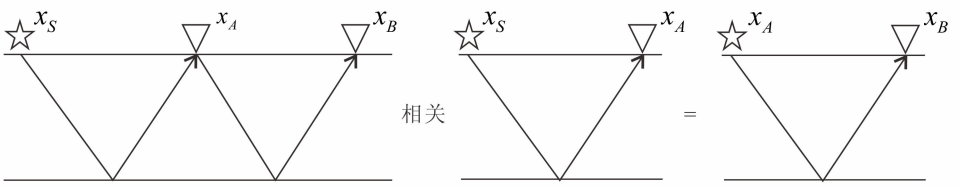
$$G(x_B \mid x_A,\omega) + G^*(x_B \mid x_A,\omega) = \int G(x_B \mid x_S,\omega)G^*(x_A \mid x_S,\omega)\mathrm{d}x_S \tag{1}$$

褶积型地震干涉在频率域表示为：

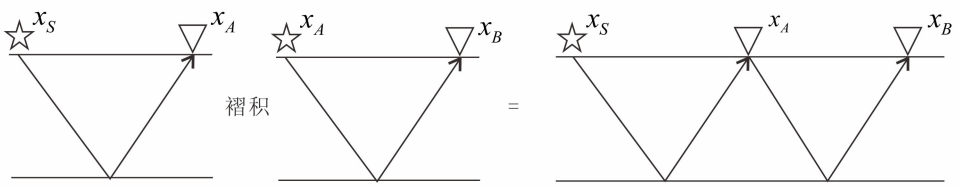
$$G(x_B \mid x_S,\omega) + G^*(x_B \mid x_S,\omega) = \int G(x_A \mid x_S,\omega)G(x_B \mid x_A,\omega)\mathrm{d}x_S \tag{2}$$

式中：$G(x_B \mid x_S,\omega)$ 表示物理震源 x_S 激发 x_B 接收的地震记录；ω 表示角频率；$G(x_B \mid x_A,\omega)$ 表示虚震源 x_A 激发 x_B 接收到的地震记录；$*$ 表示复共轭。

由式（1）可以得到，相关型地震干涉算法抵消了相同的射线径，而褶积型地震干涉算法延长了射线路径（图 1）。所以一定条件下，利用相关型和褶积型地震干涉可以重构层间多次波场。



(a) 相关型地震干涉射线路径



(b) 褶积型地震干涉射线路径

图 1 地震干涉射线路径

Fig. 1 Ray paths of seismic interferometry

在进行地震干涉计算时，并不是所有地震记录都参与到合成地震记录中，而主要贡献来源于“稳相点”（Stationary-Phase Point）。如图 2 所示，地震记录从 x_{s0} 激发，多次波被 x_{r2} 所接收，在进行干涉运算时，预测 x_{r2} 接收到的多次波，只能利用 x_{s0} 和 x_{r2} 之间的地震记录进行干涉，在 x_{s0} 左侧和 x_{r2} 右侧的地震记录并不会对干涉计算做出贡献，甚至是一种干扰（如图 2 在干涉时引入 x_{r1}' 接收到

的地震记录，对于预测 x_{r2} 接收到的多次波来说就是一种干扰，并且虚线部分的射线路径并不符合传播定律），所以在进行地震干涉时只利用 x_{s0} 和 x_{r2} 之间的地震记录，即为“稳相点”原理。

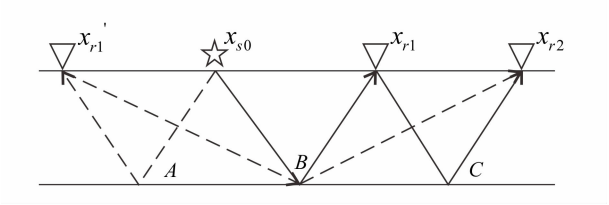


图 2　“稳相点”分析

Fig. 2　Analysis of stationary points

定义 Radon 变换为：

$$u(\tau,q) = \int G(t = \tau + q\varphi(x),x)\,\mathrm{d}x \tag{3}$$

式中：$G(t,x)$ 表示时空域的地震记录；$u(\tau,q)$ 为线性 Radon 变换后的地震记录；τ 为时间截距；q 为曲率坡度；x 表示偏移距、震源或检波器位置；$\varphi(x)$ 表示关于 x 的函数；t 为地震记录双程旅行时。

在公式（3）中，当 $t = \tau + px$ 时，即为线性 Radon 变换，所以线性 Radon 正反变换可以表示为：

$$u(\tau,p) = \int G(t = \tau + px,x)\,\mathrm{d}x \tag{4}$$

$$G'(t,x) = \int u(\tau = t - px,p)\,\mathrm{d}p \tag{5}$$

式中：$u(\tau,p)$ 为线性 Radon 变换后地震记录；$G(t,x)$ 为变换前地震记录；$p = \sin(\theta/v)$ 表示射线参数；θ 为地震波入射角；v 为传播速度；$G'(t,x)$ 为 Radon 反变换后地震记录。

对应的频率域正反线性 Radon 变换为：

$$U(p,\omega) = \int G(x,\omega)\exp(j\omega px)\,\mathrm{d}x \tag{6}$$

$$G(x,\omega) = \int U(p,\omega)\exp(-j\,\omega px)\,\mathrm{d}p \tag{7}$$

式中：$G(x,\omega)$ 为频率域原始地震记录；$U(p,\omega)$ 为频率域线性 Radon 变换后地震记录；j 为虚数单位。

结合公式（1）和公式（7），$G(x_A \mid x_S,\omega)$ 可表示为：

$$G(x_A \mid x_S,\omega) = \int U_A(p_A,\omega)\exp(-j\omega p_A x_S)\,\mathrm{d}p_A \tag{8}$$

公式（8）共轭形式可表示为：

$$G^*(x_A \mid x_S,\omega) = \int U_A^*(p_A,\omega)\exp(j\omega p_A x_S)\,\mathrm{d}p_A \tag{9}$$

将公式（9）带入公式（8），得到：

$$G(x_B \mid x_A,\omega) + G^*(x_B \mid x_A,\omega) = \iint G(x_B \mid x_S,\omega)U_A^*(p_A,\omega)\exp(j\omega p_A x_S)\,dp_A\mathrm{d}x \tag{10}$$

公式（10）中 $\int G(x_B \mid x_S,\omega)\exp(j\omega p_A x_S)\,\mathrm{d}x$ 为线性 Radon 正变换，所以可表示为：

$$G(x_B \mid x_A,\omega) + G^*(x_B \mid x_A,\omega) = \int U_B(p_A,\omega)U_A^*(p_A,\omega)\,\mathrm{d}p_A \tag{11}$$

式中：射线参数 p 取决于检波器 A 的位置。从方程（11）可知，对于线性 Radon 域，地震干涉中互相关算法可以转化成通过对相同射线参数的地震道集进行互相关并求和。同理线性 Radon 域中地震干涉褶积算法也可以转化成通过对相同射线参数地震道集进行褶积并求和得到。

2　线性 Radon 域地震干涉层间多次波预测基本原理

定义 $G(x_r \mid x_s,\omega)$ 为 x_s 处激发 x_r 处接收的频率域的格林函数，ω 表示角频率。在存在高速反射界面时，会发育较强的层间多次波（图 3）。由公式（1）和公式（2）可知地震干涉技术可以将两个已知的地震记录通过褶积或相关得到虚拟地震记录，根据 Jakubowicz[17] 提出的方法将地表观测到的波场分为 3 个部分：第一部分为界面 i 处一次反射 $G(x_{r1} \mid x_{s2},\omega)$，传播路径为 $x_{s2} - B - x_{r1}$；第二部分为界面 j 处的一次反射 $G(x_{r1} \mid x_{s1},\omega)$，传播路径为 $x_{s1} - A - x_{r1}$；第三部分为界面 j 处的另一个一次反射 $G(x_{r2} \mid x_{s2},\omega)$，传播路径为 $x_{s2} - C - x_{r2}$。

对第二部分和第三部分波场进行褶积，其结果

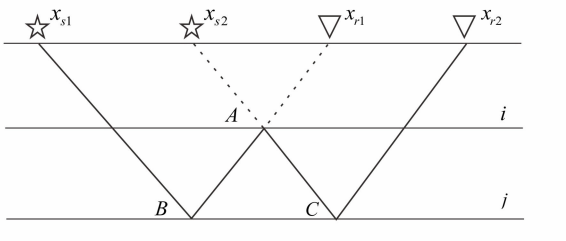


图 3 层间多次波传播示意图

Fig. 3 Ray paths of internal multiple

的传播路径为 $x_{s1} - A - x_{r1}$ 加上 $x_{s2} - C - x_{r2}$。频率域表示为：

$$\sum_{x_{s1}<x_{s2}<x_{r1}<x_{r2}} G(x_{r1} \mid x_{s1},\omega)G(x_{r2} \mid x_{s2},\omega) \quad (12)$$

将公式（12）与第一部分波场相关，传播路径为 $x_{s1} - A - x_{r1}$ 加 $x_{s2} - C - x_{r2}$ 减 $x_{s2} - B - x_{r1}$，即 $x_{s1} - A - B - C - x_{r2}$。频率域表示为：

$$\sum_{x_{s1}<x_{s2}<x_{r1}<x_{r2}} G(x_{r1} \mid x_{s1},\omega)G(x_{r2} \mid x_{s2},\omega)G^{*}(x_{r1} \mid x_{s2},\omega) = G(x_{r2} \mid x_{s1},\omega) \quad (13)$$

式中：$G(x_{r2} \mid x_{s1},\omega)$ 即为预测出的层间多次波场。

根据公式（11）和公式（13），线性 Radon 域干涉预测层间多次波公式为：

$$\int U_{r1,s1}(p,\omega)U_{r2,s2}(p,\omega)U^{*}_{r1.s2}(p,\omega)\mathrm{d}p = G(x_{r2} \mid x_{s1},\omega) + G^{*}(x_{r2} \mid x_{s1},\omega) \quad (14)$$

只考虑因果部分后得：

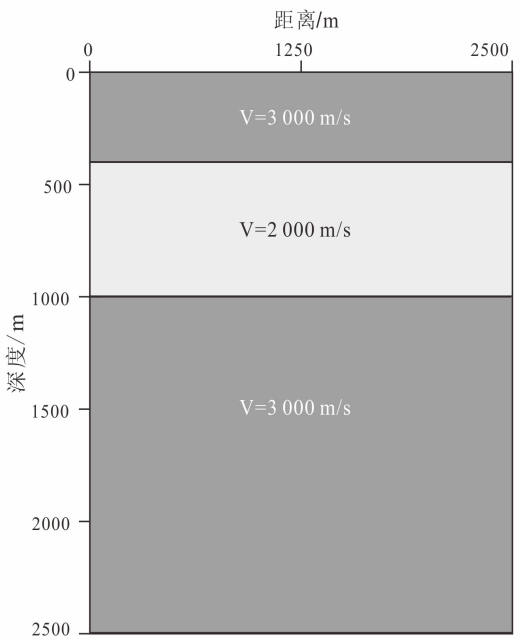
$$\int U_{r1,s1}(p,\omega)U_{r2,s2}(p,\omega)U^{*}_{r1.s2}(p,\omega)\mathrm{d}p = G(x_{r2} \mid x_{s1},\omega) \quad (15)$$

式中：$U_{r1,s1}$ 表示线性 Radon 域中 $s1$ 激发 $r1$ 接收的地震记录；公式（15）表明线性 Radon 域地震干涉技术可以对层间多次波进行预测。

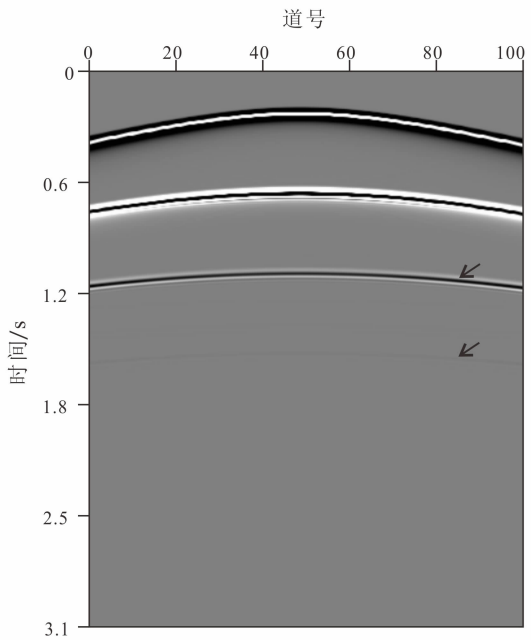
3 数值模拟

3.1 简单层状模型

如图 4a 所示，设计一个简单层状速度模型。第一层速度 3 km/s，第二层速度 2 km/s，第三层速度 3 km/s。共计 100 次震源激发，检波器布置于地表。采用吸收表面，利用有限差分法进行数值模拟。在得到的地震数据中切除直达波，得到一次反射波和层间多次波。以第50炮为例，抽取正演单



(a)速度模型



(b)单炮记录

图 4 速度模型及单炮记录

Fig. 4 Acoustic velocity model and seismic record

炮记录（图 4b，其中箭头处为层间多次波），第一层一次反射波记录（图 5a）和第一层下的一次反射波记录（图 5b）。通过公式（13）对第一层以下的一次反射波进行褶积，再与第一层的一次反射波相关，得到时空域地震干涉预测的层间多次波（图 6a），将第一层以下一次反射波和第一层一次反射波通过考虑“稳相点”选取合适的扫描孔径后进行线性 Radon 变换，通过公式（15）进行褶积和相关，得到线性 Radon 域地震干涉预测的层间多次波（图 6b）。

对比可知，地震干涉技术能够成功预测出层间多次波（图 6a 上下部箭头处），但是时空域地震干涉预测出的层间多次波存在虚假信息和干扰（图 6a 中部箭头处）。而在线性 Radon 域中，会很好地压制虚假干扰（图 6b 中部箭头处），并且由于考虑“稳相点”，将会显著减少计算时间。当选取合适的扫描孔径后，数据体积将会进一步缩小，从而提高计算效率。图 7 为简单层状模型多次波匹配减去结果，对于时空域地震干涉预测的层间多次波，由于需要考虑假象对衰减的影响，笔者选择了较大的时窗，使得减去后同相轴有明显残留，部分假象仍然存在（图 7a 箭头处）。而采用线性 Radon 域地震干涉预测的层间多次波由于没有假象存在，选择合适的窗口后减去的效果明显，层间多次波得到有效压制（图 7b 箭头处）。

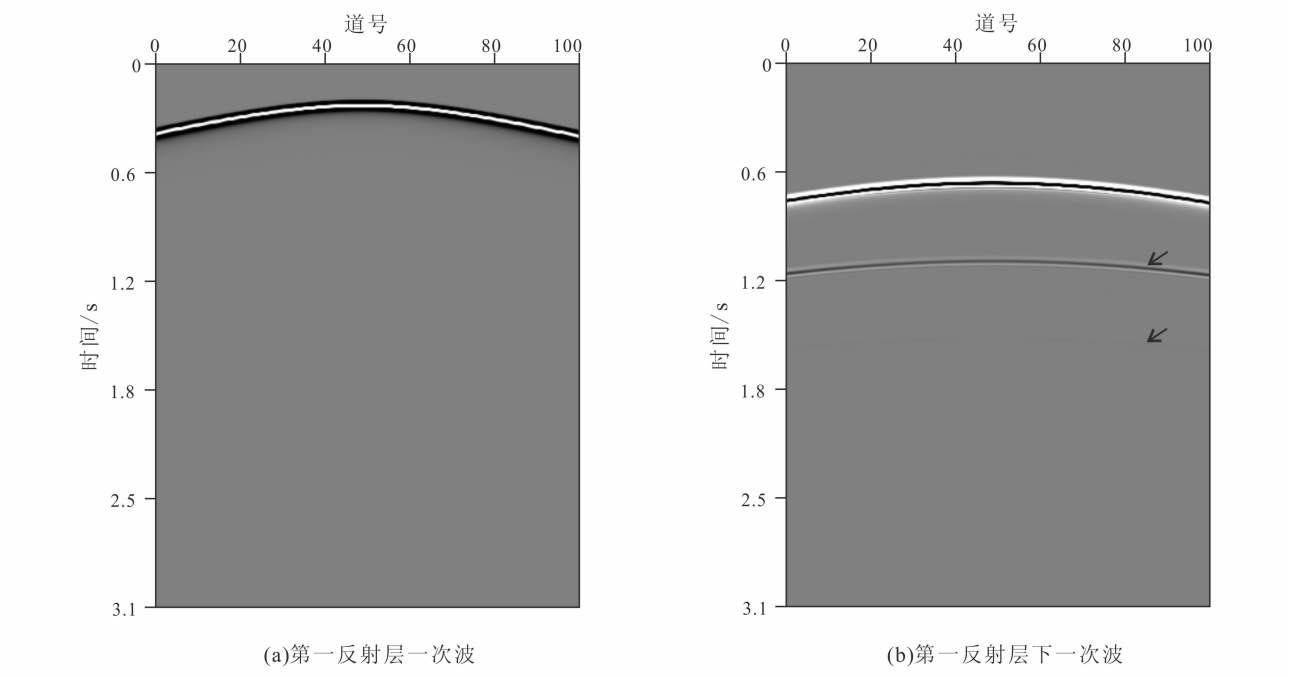


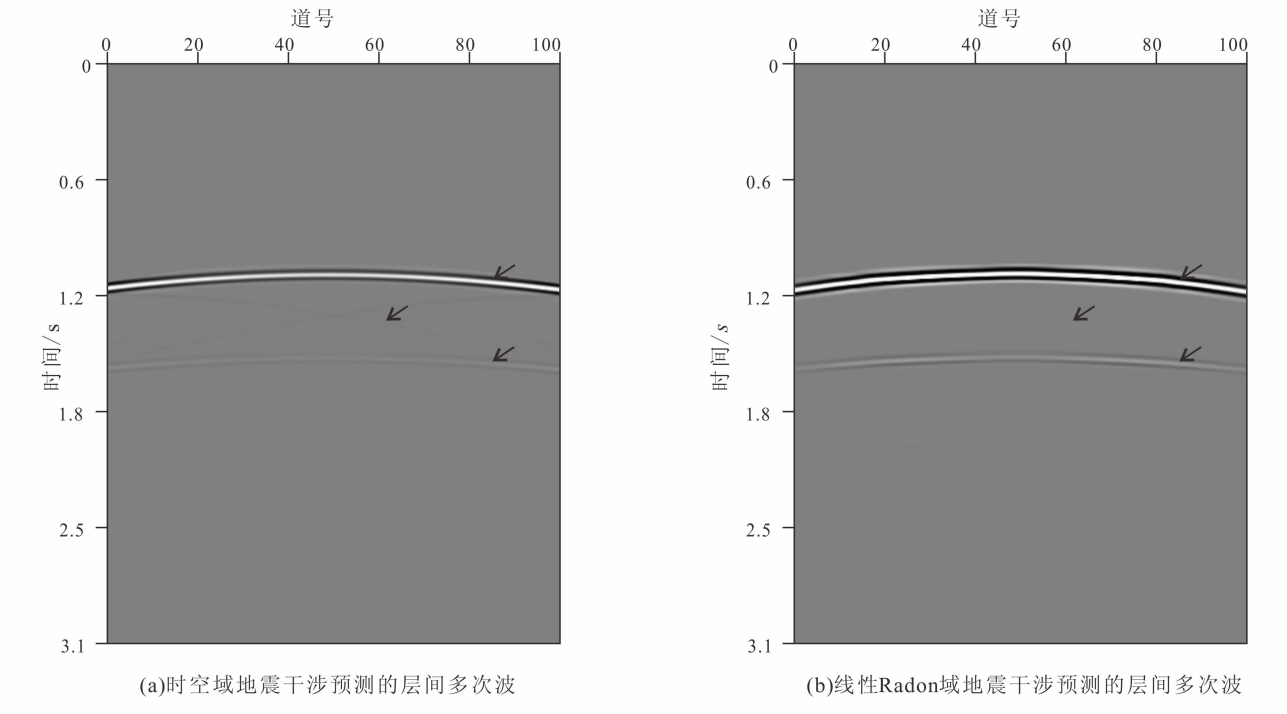
图 5　第一反射层地震记录和第一反射层下地震记录

Fig. 5　Seismic records above and below the first boundary

3.2　pluto 模型

为了进一步验证文中方法在复杂地质条件下的有效性，截取了部分 pluto 模型。对地震数据基于本文方法进行层间多次波的预测和减去。在选取的模型中，海底存在高速盐丘，并且盐丘表面不光滑，不仅发育较强的层间多次波，同时存在大量的绕射波（图 8a）。

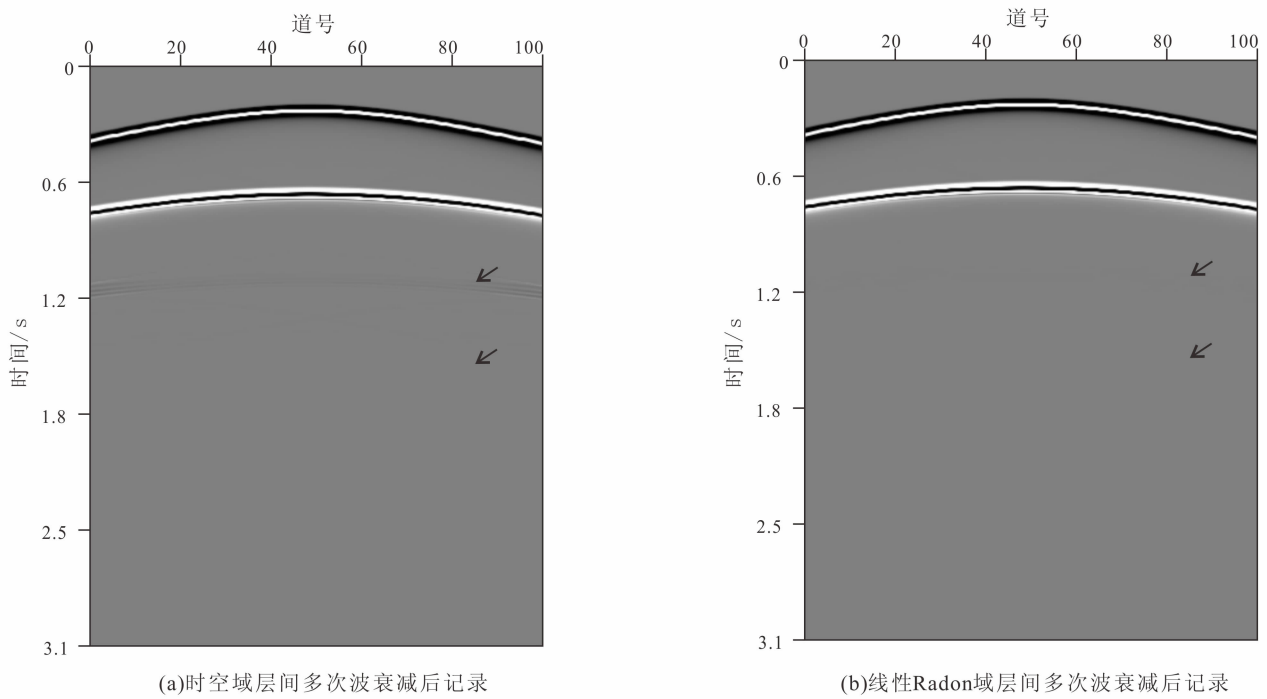
正演时采用吸收表面以去除表面相关多次波的干扰。共激发 400 次震源，在地面设置 150 道检波器排列，记录时间为 7.5 s。图 8b 为切除直达波后的正演模拟单炮记录，图 9a 为应用线性 Radon 域地震干涉预测出的层间多次波，图 9b 为利用最小二乘衰减层间多次波后的地震记录。从图 9 中可以看到层间多次波得到了很好地预测和衰减（图 9 箭头处）。为了更清楚的看到每一炮的预测及减去效果，抽取其零偏移距剖面（图 10），从单炮数据及零偏移距剖面可以明显看到原始数据 4.5 s 后大多是层间多次波，3.0 s 附近的一次波之间存在一



(a)时空域地震干涉预测的层间多次波　　(b)线性Radon域地震干涉预测的层间多次波

图6　时空域和线性 Radon 域干涉预测结果

Fig. 6　Predict results by seismic interferometry in time-space domain and linear Radon domain

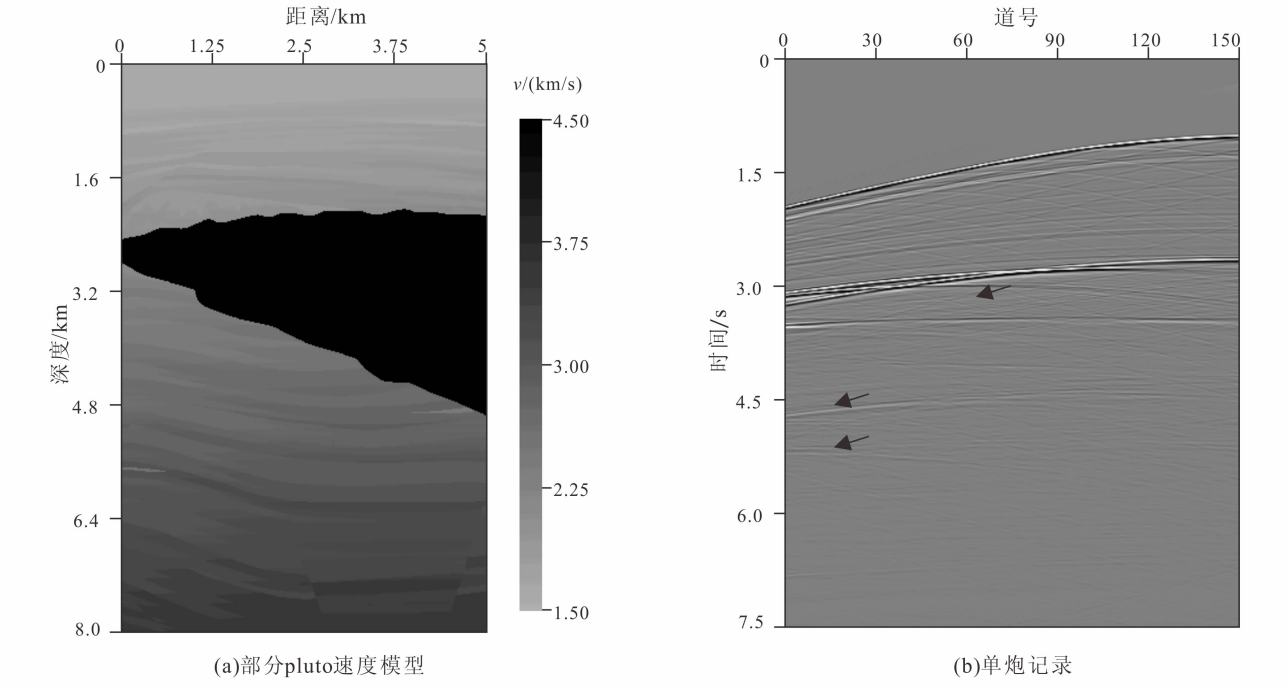


(a)时空域层间多次波衰减后记录　　(b)线性Radon域层间多次波衰减后记录

图7　时空域和线性 Radon 域干涉预测的层间多次波衰减后的记录

Fig. 7　Internal multiple elimination records which are predicted by seismic interferometry in time-space domain and linear Radon domain

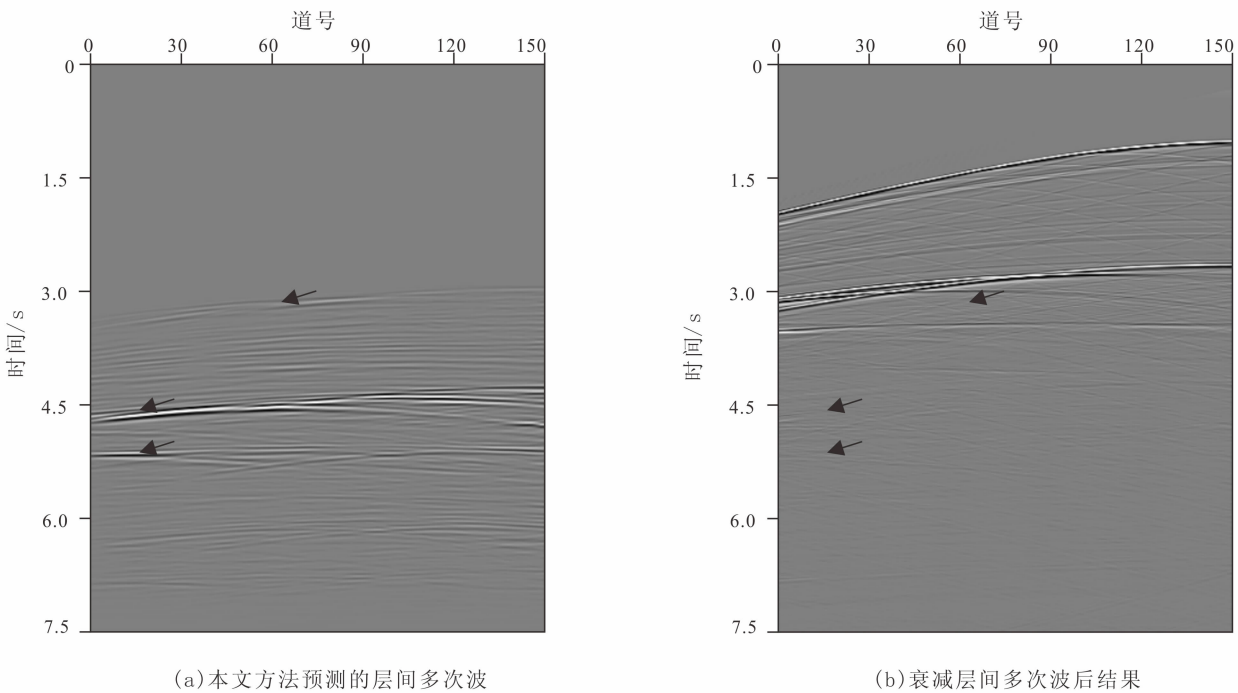
个层间多次波，这些多次波均被较好地预测并衰减（图 10 箭头处），绕射波并没有对层间多次波的预测和衰减产生较大影响。



(a)部分pluto速度模型　　(b)单炮记录

图 8　pluto 速度模型及第 200 炮单炮记录

Fig. 8　Pluto velocity model and seismic record of the 200th shot



(a)本文方法预测的层间多次波　　(b)衰减层间多次波后结果

图 9　pluto 模型层间多次波预测结果

Fig. 9　Predict results of internal multiple in pluto model

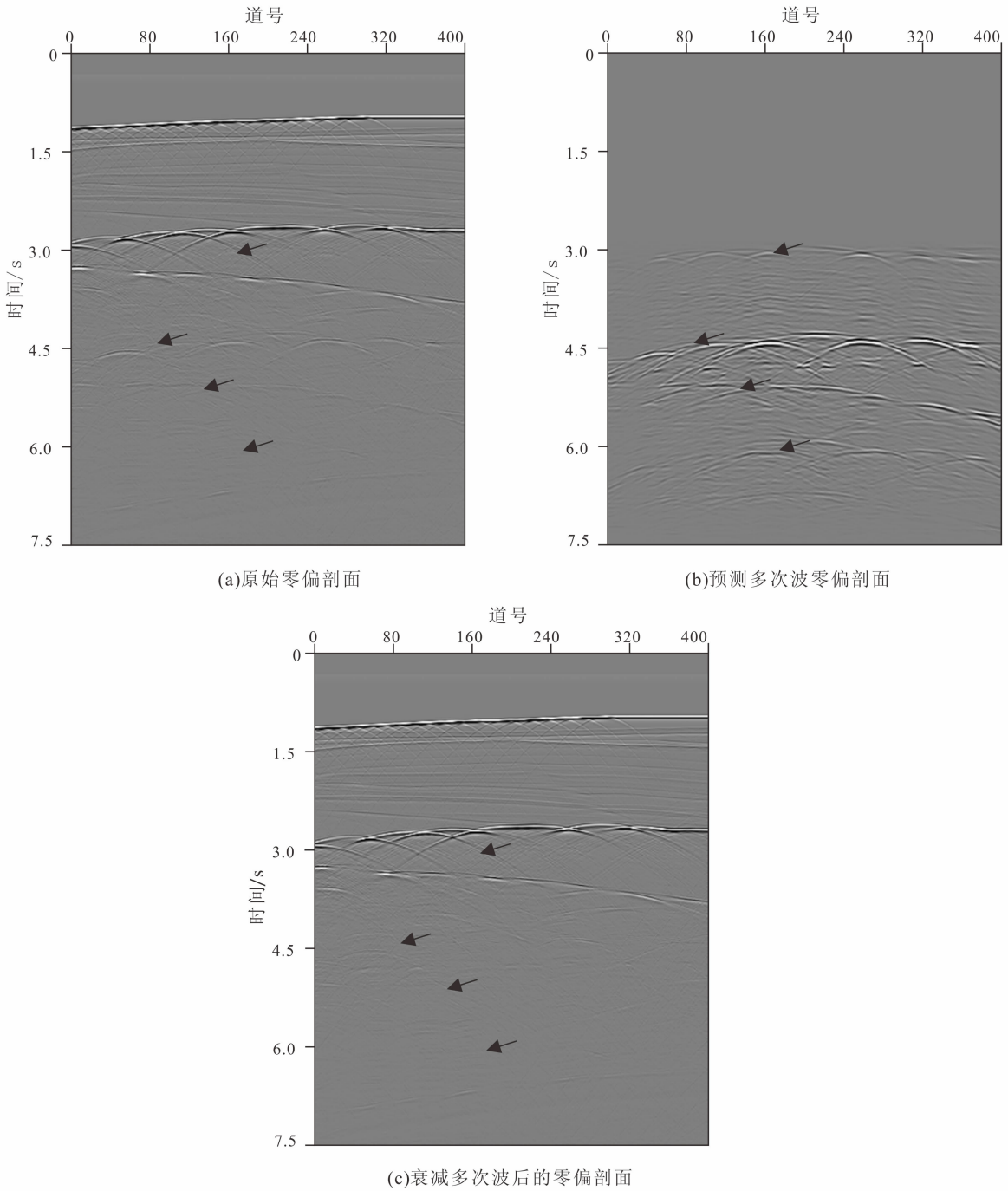


图 10 pluto 模型层间多次波预测结果零偏移距剖面

Fig. 10 Zero-offset section of predict result of internal multiple in pluto model

4 结论

（1）线性 Radon 域地震干涉层间多次波预测方法继承了时空域地震干涉法预测层间多次波方法的优点，不依赖速度、深度等先验信息，是一种数据驱动的预测方法，在选择合适的扫描孔径后，原始地震数据可以得到压缩，减小数据体积大小，结合稳相理论后进一步提高计算效率。

（2）线性 Radon 域地震干涉层间多次波预测方法可以对时空域中预测层间多次波时产生的假象

进行压制，提高衰减后地震记录质量，并且在复杂地质环境下同样有良好的预测效果，具有一定的实际生产意义。

参考文献：

[1] 马继涛，陈小宏，姚逢昌，等. 基于一次波逆时理论的层间多次波衰减方法［J］. 石油地球物理勘探，2013，48（2）：181-186，254.
MA Ji-tao，CHEN Xiao-hong，YAO Feng-chang，et al. Internal multiple attenuation using time-inverted primary［J］. Oil Geophysical Prospecting，2013，48（2）：181-186，254.

[2] 熊登，赵伟，张剑锋. 混合域高分辨率抛物 Radon 变换及在衰减多次波中的应用［J］. 地球物理学报，2009，52（4）：1068-1077.
XIONG Deng，ZHAO Wei，ZHANG Jian-feng. Hybrid-domain high-resolution parabolic Radon transform and its application to demultiple［J］. Chinese Journal of geophysics，2009，52（4）：1068-1077.

[3] Berkhout A J，Verschuur D J. Removal of internal multiples with the common-focus-point（CFP）approach，Part 1-explannation of the theory［J］. Geophysics，2005，70（3）：45-60.

[4] Weglein A B，Gasparotto F A，Carvalho P M，et al. An inverse-scattering series method for attenuation multiples in seismic reflection data［J］. Geophysics，1997，62（6）：1975-1989.

[5] 袁伟. 逆散射序列对多次波压制的研究：硕士学位论文［D］. 西安：长安大学，2011.
YUAN Wei. Research on using inverse scattering series to attenuate multiple：master's degree thesis［D］. Xi'an：Chang'an University，2011.

[6] Claerbout J F. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response［J］. Geophysics，1968，33（2）：264-269.

[7] Rickett J，Claerbout J F. Acoustic daylight imaging via spectral factorization：helioseismology and reservoir monitoring［J］. The Leading Edge，1999，18：957-960.

[8] Schuster G T，Sheng J，Yu J，et al. Interferometric/daylight seismic imaging［J］. Geophysics Journal International，2004，157：838-852.

[9] 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.

[10] 朱恒. 地震干涉技术研究与应用：博士学位论文［D］. 长春：吉林大学，2015.
ZHU Heng. The study and application of seismic interferometry：doctor's degree thesis［D］. Changchun：Jilin University，2015.

[11] 巩向博. 高精度 Radon 变换及其应用研究：硕士学位论文［D］. 长春：吉林大学，2008
GONG Xiang-bo. High resolution Radon transform and applications：master's degree thesis［D］. Changchun：Jilin University，2008.

[12] 巩向博，韩立国，王恩利，等. 压制噪声的高分辨率 Radon 变换法［J］. 吉林大学学报（地球科学版），2009，39（1）：152-157.
GONG Xiang-bo，HAN Li-guo，WANG En-li，et al. Denoising via high resolution Radon transform［J］. Journal of Jilin University（Earth Science Edition），2009，39（1）：152-157.

[13] 范景文，李振春，宋翔宇，等. 各向异性高分辨率 Radon 变换压制多次波［J］. 石油地球物理勘探，2016，51（4）：665-669.
FAN Jing-wen，LI Zhen-chun，SONG Xiang-yu，et al. Multiple attenuation with anisotropic high-resolution Radon transform［J］. Oil Geophysical Prospecting，2016，51（4）：665-669.

[14] 程浩. 被动源数据地震波干涉一次波估计方法研究：博士学位论文［D］. 长春：吉林大学，2016.
CHENG Hao. Study on passive seismic interferometry and primary estimation：doctor's degree thesis［D］. Changchun：Jilin University，2016.

[15] 梁全有，韩立国，巩向博. 各向异性 Radon 变换在深水地震多次波压制中的应用［J］. 世界地质，2014，33（2）：484-487.
LIANG Quan-you，HAN Li-guo，GONG Xiang-bo. Application of anisotropic Radon transform in deep sea seismic multiple wave attenuation［J］. Global Geology，2015，33（2）：484-487.

[16] 朱恒，王德利. 抛物 Radon 域地震干涉技术［J］. 世界地质，2015，34（2）：484-490.
ZHU Heng，WANG De-li. Seismic interferometry in parabolic Radon domain［J］. Global Geology，2015，34（2）：484-490.

[17] Jakubowicz H. Wave equation prediction and removal of interbed multiple［C］. SEG Technical Program Expanded Abstracts，1998（27）：1527-1530.