

Research and Application of Marine Wide-Band Seismic Data Processing Technology

Xuqian Wang

China National Offshore Oil Corporation Tianjin Oilfield Service Co., Ltd., Tianjin, 300451, China

Abstract

The seismic data of conventional cable always loses frequency of 0-8hz, but broadband seismic using variable depth of streamers can get wider bandwidth, which can reach 2.5-150h. As the depth of steamer increase, notch effect will become much more serious, so the technique of de-ghosting is much necessary, and it is the key in broadband seismic data processing. This paper has done plentiful research in the characteristic of broadband seismic data's wave field, and the mechanism of ghost, mainly introduced the technique of de-ghosting and wave field continuations. This technique has acquired much well result in marine broadband seismic data processing, it successfully break the monopoly of foreign oil companies, and has Broad application prospects.

Keywords

broadband seismic, slant tow, ghost, wave field continuations, tau-p transform, notch

海洋宽频地震处理技术研究与应用

王旭谦

天津市滨海新区中海油田服务股份有限公司，中国·天津 300451

摘要

常规拖缆采集往往缺失0-8HZ低频信息，宽频变深度采集方法可以有效的解决这个问题，频带宽度可达到2.5-150HZ,地震频带更宽。由于随着电缆深度的增大，鬼波造成的陷波效应也会增大，所以鬼波压制技术是非常关键的。本文深入探讨了海上宽频数据的波场传播特征、资料品质特点，及鬼波产生机理；重点介绍了鬼波压制技术、波场延拓校正的原理和实现方法。本技术在海上宽频资料处理中取得了良好的应用效果，打破了国外石油公司对宽频处理技术的垄断，有着广大的应用前景。

关键词

宽频地震；斜缆；鬼波；波场延拓；tau-p变换；陷波

1 什么是宽频地震

随着油田的勘探开发，对地震资料的频带要求越来越高。低频信息可信度高，在反演中有着举足轻重的作用，有利于确定油田的形态、整体结构；高频信息更有利于区分细小的沙体分层、准确的确定油水边界，在油气田的开发阶段尤为重要。如何得到并处理好宽频地震资料，是现阶段勘探开发的重点问题之一。电缆的沉放深度直接影响地震资料的带宽，较浅的沉放深度能得到较好的高频信号，低频信号受到严重衰减，较深沉放可以保护低频，高频信号又会被严重衰减。

宽频变深度地震勘探是近几年最新发展，而发展迅速的一项新的地球物理技术。它是将电缆藏深度随偏移距增大而变化，来拓宽地震频带的技术。目前它的采集方式主要有以下四种方式。

【作者简介】王旭谦（1973-），男，中国河北石家庄人，本科，高级工程师，从事地震资料处理解释研究。

宽频地震这一技术，始于高分辨率成像技术的不断追求。从 20 世纪的 90 年代开始，伴随着市场经济对于深海和复杂的地质技术不断提升的勘验需求，传统所采用的固定深度拖缆采集技术逐渐显示出频带窄、频率有所缺失等多种性质和特点。自 2000 开始，伴随着数字化、智能化的不断发展，数字检波器和高性能计算等也在不断进步，变深度拖缆也呈现出技术水平上升趋势，能够实现从低频范围到高频范围的有效提升。在深水区和盐下成像过程中均能够显示出一定优势。当前，在国际上，主流的石油公司，比如：CGG、PGS 等，都已经推出了来自各自领域的宽频采集技术以及对应的解决方案，并且将其在全球多个海域中进行应用。

在我国国家市场上，宽频地震技术这一领域的研究相对起步较晚一些，但是发展过程比较迅速。自从“十二五”以来，我们国家重点在科技专项、海洋油气等勘验项目领域相继进行技术攻克，并且实现在南海和东海等多个深水工业区进行宽频采集实验与处理研究等相关实验，随之取得了一定的突破性进展和成果。这一技术的突飞猛进，不仅能够提

升对于油气储层的精准识别程度，也能够位深水区所存在的复杂结构进行解释，以及对检测烃类工作提供相关的可靠数据。

2 宽频地震数据的优势

1). 更精确的反演结果。常规拖缆采集的地震数据往往缺失低频信息，反演过程中需要建立低频信息模型，通常通过井信息建立的，当井少，地质情况又复杂时，无法构建精确的低频信息模型。宽频数据中包含丰富的低频信息，能满足反演的需求。

2). 更利于解释。宽频数据中有丰富的低频信息，这样就能得到旁瓣更小的子波，能更容易地解释同相轴，更好地解释地层细节。增加的低频信息能很好地识别层位，显示出精细的波阻抗特征，更好的成像。低频信息穿透力强，能对较深的地质体和复杂盖层之下的目的层进行更好的成像。同时，斜缆数据的分辨率更高。

3). 更能够提升流体识别能力和储层预测能力。宽频地震相关资料会因为其本身具有全频带覆盖的特性，对于储层岩性的识别、预测孔隙程度、检测油气性等方面都具备十分明显的优势。低频性质的信息能够对于构建稳定的波阻抗背景产生一定的辅助作用，高频的细节能够对薄互层的刻画以及储层内部的结构产生刻画。同时，结合振幅会随着偏移距离产生变化这一特性，进行分析和叠前反演，能够使得宽频数据对于检测烃类的成功率进行有效提升，从而减少和降低探勘方面可能存在的风险。

4). 更能够通过对多波多分量地震勘探工作的融合发展进行支持。宽频采集技术会和多波多分量勘探工作进行结合，从而利用纵波与转换横波相关信息，最终完成对各向异性、裂缝发育及流体性质的更加全面的刻画。宽频横波资料在天然气藏识别和流体区分等方面都具有十分独特的价值，这也是未来海洋地震勘探将会进行发展的的重要方向。

5). 更能够适用于深水和复杂地质区的勘探工作。伴随着勘探目标朝着深水、超深水以及复杂构造区延伸工作，地震信号衰减现象产生十分严重，因此，对于低频成分的保留工作就显得尤为关键。通过增强低频能量对于宽频进行采集，从而对深层信号的信噪比与成像精度进行提升，此项内容均已在南海深水区、墨西哥湾及西非等海域取得显著应用成效。

3 鬼波产生的机理

研究宽频变深度采集资料，研究鬼波产生机理及传播特征是非常必要，这也是研究鬼波压制技术的基础。

海上地震勘探，由于震源激发和电缆检波器接收均在海水面以下，往往容易产生虚反射（如下图所示）。虚反射既可以发生在震源端，也可以发生在接收端。在震源端，波场中的上行波在进入地下岩石之前，先经过了海水自由界面的反射；在接收端，上行波部分在经过了海水自由界面的反

射之后，才被检波器接收。震源和检波器造成的虚反射能够减小频带宽度，从而降低垂向分辨率。

地震信号频率域表达式为：

$$|H(\omega)| = |S(\omega)| * |2 \sin(\pi * f * \Delta t)|$$

当 $f = 1/\Delta t = \frac{V_{\text{水}}}{2RCV_WATRDEPTH}$ ，即当频率为水速除以二倍水深的整数倍时，该频率为陷波点，而第一陷波点为零赫兹。当缆深小于 10m 时，一次波和鬼波叠和在一起，波形没有完全分开，并改变了一次反射波的相位。随着缆深的增大，地震子波低频信息和高频信息都变得更丰富。由于鬼波的存在，鬼波对地震子波某些频带的能量有加权的作用。当电缆较前时，地震子波能量较强。在理论上，当把鬼波完全消除后，地震子波在部分频带的能量会变弱。

鬼波这一影响因素对地震数据会产生的波动不仅体现在频谱陷波上，还会表现在相位畸变、振幅衰减及波形拉伸等多方面。在浅层，鬼波和一次波时间差小，会对波形干涉与频率选择性造成衰减；在深层，鬼波延迟增大，也会导致同相轴产生重复或模糊现象，从而影响构造解释最终的准确性。于此同时，鬼波协这一现象，也会伴随着偏移距、水深及海底性质所产生的变化而变化，特别是在复杂海底地形区，多次波和鬼波所产生的耦合效应更为显著，这一现象会给数据处理工作带来十分巨大的挑战。

面对不同的采集方式，鬼波特征也会存在一定差异。斜缆采集会因为其本身深度渐变等特点，最终会导致鬼波陷波频率伴随着偏移距平滑而产生变化，这一特性对于后续处理中通过多通道联合反演实现鬼波压制会产生有利影响。但是传统的平缆采集的陷波频率固定，会造成压制难度相应提升。为此，需要进行采集设计与鬼波处理协同优化处理，从而实现效果最佳宽频状态。

4 斜缆数据电缆鬼波消除技术

基本原理：

平缆数据 TAU-P 变换： $d(x_n) = Lm(p_j)$ ，其中 $L = e^{-i\zeta\tau_{n,m}} = e^{-i\omega p_m x_n}$

而斜缆数据 TAU-P 变换： $L^H = L_{pr}^H + R * L_{gh}^H = e^{i\omega\tau_{pr}} + R * e^{i\omega\tau_{gh}}$

其中 R 为海平面反射系数

利用斜缆的正变换算子可以求得：

1) 当 $L^H = L_{pr}^H + R * L_{gh}^H$ 时，得到海平面无虚反射的 tau-p 域模型

2) 当 $L^H = L_{pr}^H$, R=0 时，得到海平面含有虚反射的 tau-p 域模型。

模型试算：通过理论模型的验证分析，斜缆 TAUP 变换消除电缆鬼波方法，可以很好的压制电缆鬼波，补偿频谱上的陷波点。海上常规静校正处理是将检波器点接收到的波场信息校正到垂直于海平面的 Q 点，而该波场实际传播到

海平面的实际位置为 P 点。通过波场延拓的技术可以将不同深度检波器接收到的波场信息沿传播方向延拓到海平面上真实的位置，减小了校正误差。

除了需要对 tau-p 进行方法变换以外，还包含了波场分离法、反褶积法、联合反演法等多种鬼波压制技术。波场分离这一方法主要通过上下缆或震源，对于端波场重构进行接收，从而实现上行波与下行波的分离，最终实现鬼波的消除。此方法对数据规则性要求高，但是对于采集工作中，可能会实际产生空缺或噪声时限制一些效果。反褶积这一法，是基于统计或者鬼波算子进行确定性模型估算工作，此法适用于资料信噪比较高的场景。联合反演这一方法则是通过鬼波压制与速度建模、成像的工作过程进行结合，最终在最小二乘偏移或全波形反演框架下进行同步优化，这也是当前研究领域里一直备受关注的研究热点。

斜缆数据鬼波消除这一工作的核心在于对于检波器深度变化进行准确描述，并且对波场传播路径的影响进行研究。在实际的处理工作中，需要对导航定位数据、电缆姿态信息及海水速度模型，建立精确的检波器位置以及波场延拓算子进行结合。与此同时，也应当对于海水面波动、波浪噪声及涌浪效应等因素进行考虑，最终计算和记录对鬼波模型的影响，在必要时刻，也应当对于时变校正与自适应滤波技术进行引入。

波场延拓校正这一技术的成功实施，离不开高精度数值算法，比如相移法、有限差分法或谱方法等。因此，在深水区，若考虑速度纵横向变化会对延拓精度的影响，则通常需要采取层析或者波形反演手段优化速度模型。在进行延拓的过程中，还应当考虑到注意振幅保持和相位的一致性，从而避免产生引入人为的系列假象。

5 实际资料测试

实例 1：实际资料为我国南海某深水工区变深度斜缆采集宽频数据，电缆深度变化在 7-50m 之间，电缆长度 6000 米。有效频带在 2.5Hz ~ 130Hz 之间。枪深 5m。

从常规处理和宽频处理两种结果的对比可以看出，去鬼波的偏移成果分辨率更高，小断层更加清晰，基地处鬼波产生的虚轴得到很好的压制。地震频带更宽。

实例 2：实际资料为我国南海某深水工区变深度斜缆采集宽频数据，电缆深度变化在 5-30m 之间，电缆长度 6000 米。枪深 6m。

6 结论

本文从宽频地震勘探的机理出发，研究了宽频地震鬼波产生的机理，开发了一套效果良好的宽频去鬼波技术，该技术能够有效的压制电缆鬼波，消除了陷波效应，有效的拓

宽了地震频带；针对斜缆静校正问题，本文同样开发了基于波场延拓的校正技术，减小了校正误差。

虽然宽频地震技术当前已经取得了水分显著的工作进展，但是在实际应用过程中仍然会面临各种挑战。首先，对于宽频采集成本较高，并且缆深变化的设计过程和作业的难度大，特别是在高海况区域想要进行实施是十分困难的。其次，对于鬼波的压制效果是需要依赖于精确的检波器定位以及海水速度及反射系数估计工作，并且任何的误差都会可能产生残留鬼波或过度压制现象。与此同时，宽频数据的数量十分庞大，处理的流程十分复杂，对于资源的计算和算法的工作效率都会提出更高的标准和要求，未来的宽频地震技术将会朝着采集 - 处理 - 解释一体化、人工智能辅助处理、多物理场联合勘探、实时处理与质控、绿色勘探与低频保护等方向进行发展。随着各海域油田的勘探开发进展，宽频地震资料的需求就会大幅增加。本技术的研发是响应国家关键核心技术：海上高精度地震勘探技术，是国内海上宽频处理技术的一项重大突破。本研究成果既能指导采集，又能进行宽频处理生产，打破了国外石油公司对宽频处理技术的垄断，具有非常广泛的应用前景和战略意义。

参考文献

- [1] Robert Soubaras and Yves Lafet ,Variable-depth streamer acquisition Broadband data, GEOPHYSICS, VOL. 78, NO. 2,2013,
- [2] Frederic MOINET, Michel DENIS, Valérie BREM,Is Broadband Land Seismic As Good As Marine Broadband, 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013,
- [3] B. Bai, C. Chen, M. Yang , P. Wang,Ghost Effect Analysis and Bootstrap Deghosting Application on Marine Streamer Data, 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013,
- [4] Robert Soubaras and Yves Lafet, Variable-depth streamer acquisition: broadband data for imaging and inversion, 2011 SEG San Antonio 2011 Annual Meeting,
- [5] Ronan Sablon, Yves Lafet,Challenges and benefits of variable-depth streamer: from acquisition to interpretation. Istanbul International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, Istanbul,Turkey, 17-19 September 2012
- [6] 谢玉洪, 李列, 海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用, 石油地球物理进展, 2012, 6, 47 (3) ,
- [7] 张军华, 王要森, 郑旭刚等, 海上地震资料多次波特征分析, 石油地球物理勘探, 2009, 5, 44,
- [8] 李振春, 张军华, 地震数据处理方法, 山东东营, 中国石油大学出版社, 2004
- [9] 田根海, 黄兆辉, 海上勘探鬼波产生的机理及压制方法研究, 西部探矿工程, 2012, 2, 61