

李成博,张宇.CSI:基于压缩感知的高精度高效率地震资料采集技术[J].石油物探,2018,57(4):537-542

LI Chengbo,ZHANG Yu.CSI: An efficient high-resolution seismic acquisition technology based on compressive sensing[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(4):537-542

CSI:基于压缩感知的高精度高效率地震资料采集技术

李成博,张宇

(美国 ConocoPhillips 国际石油有限公司,休斯敦 77079)

摘要:介绍了 CSI(Compressive Seismic Imaging)技术。该技术是基于压缩感知理论所开发出的一整套地震资料采集和处理综合技术,主要包括非规则最优化采样设计、地震信号的稀疏化处理、基于稀疏反演的数据重构及同时震源分离等内容。CSI 利用非规则最优化设计和独立同时震源作业,极大地提高了采集效率,缩短了采集周期,从而以较低成本完成高品质、高密度的三维地震资料采集。在地震资料处理过程中,通过信号分离与数据重建来高保真地恢复叠前地震信号。海底节点、海上拖缆和陆地可控震源等生产项目中的应用结果表明,与宽频带处理以及叠前深度偏移技术相结合,CSI 提供了高质量、高精度的地下成像结果。

关键词:压缩感知;非规则采样;稀疏反演;高效高密度采集;叠前深度偏移

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-1441(2018)04-0537-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2018.04.006

CSI: An efficient high-resolution seismic acquisition technology based on compressive sensing

LI Chengbo,ZHANG Yu

(ConocoPhillips, Houston 77079, USA)

Abstract: This paper introduces compressive seismic imaging (CSI) technology. Based on the theory of compressive sensing, the CSI technology has been developed for seismic acquisition and processing, including non-uniform optimal sampling, sparse representation of seismic data, and inversion-based data reconstruction and simultaneous source separation. CSI utilizes non-uniform optimal design and independent simultaneous source operation to significantly increase the efficiency and reduce the duration of acquisition. Therefore, high-density 3D acquisition can be achieved at lower cost with higher resolution. Inversion-based data-reconstruction and source-separation techniques also provide high-fidelity pre-stack data in processing. CSI technology has been successfully applied to ocean-bottom node, marine streamer, and land Vibroseis acquisitions in production. In combination with broadband processing and pre-stack depth migration, CSI technology offers high-quality and high-resolution subsurface imaging.

Keywords: compressive sensing, non-uniform sampling, sparse inversion, efficient high-density seismic acquisition, pre-stack depth migration

地震资料为油气勘探提供了重要的信息基础。三维地震采集的概念早在 20 世纪初期就已出现,但受当时采集设备和计算能力(包括资料显示、处理、成像以及解释能力)的限制,这项技术一直未能得到实际应用。直到 1967 年才在美国德克萨斯州首次进行了三维地震资料采集。1972 年,美国进行了三维地

震采集的评估。与此同时,地震资料处理和成像方法也取得了长足进步,客观上推动了三维采集的发展。至 2000 年,三维叠前深度偏移技术迅猛发展,并且不断更新换代。今天,三维地震资料应用于油气勘探到开发各个环节。生产部门对地质构造分析和储层预测的精度要求不断提高,地震资料采集必须为石油勘

收稿日期:2018-04-14;改回日期:2018-05-12。

作者简介:李成博(1984—),男,博士,现任美国 ConocoPhillips 公司高级地球物理师,主要从事地震资料高效采集和处理方法的研究与生产工作。
Email: Chengbo.Li@conocophillips.com

通讯作者:张宇(1969—),男,博士,现任美国 ConocoPhillips 公司地球物理研发部门经理,长期从事叠前深度偏移的理论方法研究与生产软件开发工作。

探提供足够的地质信息。

三维拖缆作业是海上地震资料采集的主要方式。早期拖缆采集在主测线方向一般有 6~9 km 的炮检距,而联络测线方向的炮检距只有几百米,所以只能采集到很窄方位角范围内的反射信号。对于复杂的地质构造,如断层发育带或复杂盐丘体,窄方位角数据只能沿单一方向进行成像,无法呈现出真实完整的三维构造。2006 年前后,人们在墨西哥湾率先测试了宽方位角采集,很快被业界广泛接受。宽方位角采集利用 3~4 艘震源船平行行驶、轮流激发,以达到拓宽方位角信息的目的,进而增加成像照明,提高信噪比。将其与各向异性建模和偏移方法相结合,有效改善了复杂盐丘体和盐下的成像效果。近十年来,海上拖缆采集技术不断创新。深海勘探从窄方位角走向宽方位角、多方位角、以至全方位角采集。另一方面,全波形反演技术的应用要求地震信号具有大炮检距和丰富的低频反射信息,于是又出现了多种特大炮检距(15~25 km)和宽频地震采集方式,极大地促进了深海勘探技术的发展。

陆上三维采集早于海上应用,始于 20 世纪 70 年代。早期的陆上三维设计重视共中心点-炮检距的均匀分布,强调利用震源与检波器阵列提高单炮信噪比。由于受采集成本的限制,三维地震资料的覆盖次数较低,为获得均匀的炮检距分布,大多采用窄方位角的采集方式。2000 年后,随着对叠前偏移理解的深入,共中心点覆盖率不再是陆上三维采集质量的唯一衡量标准。人们更关心在满足炮检距和方位角均匀采样的同时是否能够更加有效地对地震波场进行完整的采集,减少采集中的假频效应,并且提高分辨率。采集方式也从震源与检波器阵列逐渐变成单点高密度全方位角采集。地震道密度与采样率成为衡量三维地震资料品质的关键参数。高效、高密度三维采集已成为陆上勘探的主要采集方式。

三维地震资料采集设计需要考虑很多因素,包括地质构造、速度模型、采集时窗、采集费用等。传统的地震资料采样率由勘探区域的最小速度(v_{\min})和最高采集频率(f_{\max})决定。例如,假设在某采集区域, $v_{\min}=1500$ m/s。我们希望采集的地震数据至少在 $f_{\max}=60$ Hz 以下没有假频,那么由 Nyquist-Shannon 采样定理导出的理想空间采样率 $\Delta \leq v_{\min}/(2f_{\max})=12.5$ m。也就是说,为了满足理论精度,理想的三维设计应保证炮点距、炮线距、检波点距和检波线距均为 12.5 m 或更小,这样才能满足地震采集数据在各个方向上 60 Hz 以下均没有假频的要求。在实际生产中,如此致密的采集(大于 4×10^7 道/km²)几乎不

可能完成,更何况陆上高分辨率资料对采集精度的要求经常远超过 60 Hz。实际的三维地震采集受费用、人力、设备、时间和地质条件等的限制,采集能力和理想设计的要求相差甚远,不得不在一个方向或者多个方向降低空间采样率,如增加炮点距至 25 m,增加炮线距与检波器线距至 200 m。这相当于所采集到的地震资料比理论要求差了 512 倍!传统的采样理论认为在数据采集过程中降低采样率将不可避免地导致假频的出现,进而影响资料处理以及成像的质量。而实际生产经验告诉我们,一部分的采集假频往往可以采用资料处理手段得以弥补。在这方面,理论预测和实际结果之间一直存在差距。压缩感知理论的出现,为我们提供了新的理论和工具来分析和指导地震资料的采集和处理。

本文对压缩感知理论作了简要介绍。这一理论的提出,突破了传统 Nyquist-Shannon 采样定理的限制,特别是对于具有稀疏表达方式的信号,可以采用远低于传统采样率的样本来高精度地进行数据重构。CSI 是基于压缩感知理论所开发出的一套地震资料采集和处理综合技术,包括非规则最优化采样设计、地震信号的稀疏化处理、基于稀疏反演的数据重构以及同时震源分离等技术内容。介绍了 CSI 技术在海底节点、海上拖缆和陆地可控震源等多种地震资料采集和处理中的实际应用,无论是采集效率还是成像精度都有显著的提高。最后,对该技术进行了总结 and 展望。

1 压缩感知与 CSI 技术

Nyquist-Shannon 采样定理一直是指导信号采集的理论基础。该定理告诉我们,当采样频率大于模拟信号中最高频率的 2 倍时,模拟信号可以通过所采集到的离散样本完全得到恢复。Nyquist-Shannon 采样定理只对信号特征做了频带有限假设,给出了信号还原的充分条件。在很多实际应用中,我们感兴趣的信号往往存在一定的内在结构且包含大量冗余信息。如果对于这类信号在采样时依然遵循 2 倍最高频率的准则就显得过于保守。

2006 年, Candes 等提出了压缩感知 (Compressive Sensing, CS) 理论^[1-3],该理论突破了传统 Nyquist-Shannon 采样定理的限制,指出在很多实际应用中采用远低于 Nyquist 采样率的不完备测量即可高精度、高几率地重构数据。例如:对于长度为 N 的信号 s ,如果能够找到一组正交基 Ψ ,使得 s 在 Ψ 下的表达是稀疏的,只含有 K 个非零值。那么我们

要寻找一组与 Ψ 不相关的观测系统 Φ 对 s 进行观测采样。理论上可以通过比 N 小得多的样品数 M 来恢复原始信号 s 。压缩感知理论主要包括以下 3 个核心要素:目标信号的稀疏表达、观测系统的非规则采样以及稀疏反演下的数据重构。我们结合在地震资料采集中的应用对这 3 点做详细讨论。

压缩感知理论能够利用信号的稀疏性,在获取信号的同时对数据进行压缩,不但节省了信息的存储空间,还提高了信号的使用效率。对图片采用压缩感知技术,一般在数据压缩 4 倍的情况下仍然能够达到 95% 以上的保真度。压缩感知理论促成了信号采集方式的观念性改变,在信号与图像处理领域得到了成功应用。我们认为,在地球物理的应用中,压缩感知原理并不只是一种新的地震资料处理技术,它是可以从根本上改变地震资料采集和处理方式的基础概念。

许多学者对压缩感知在地球物理中的应用进行了探索。HENNENFENT 等^[4]于 2008 年首次提出了利用压缩感知理论进行地震资料的非规则采样和数据重建。HERRMANN^[5]于 2010 进一步阐述了压缩感知与随机采样在数据采集上的优势,并论证了利用 curvelets^[6]稀疏化地震资料的可行性。MOLD-OVEANU^[7]根据海上采集的限制条件,采用环形炮点激发的方式来实现随机采样,并用有限差分进行模拟实验。NEELAMANI 等^[8]根据压缩感知理论,利用随机带限脉冲波形产生同时震源,结合格林函数的稀疏性进行波场重建,从而达到致密采样正演建模的高效性。MA 等^[9]针对地震信号特点提出简单路径小波变换(EPWT),与传统小波变换相比,EPWT 能够更加有效地稀疏化地震信号并减少变换过程中的人为噪声。MANSOUR 等^[10]建议利用压缩感知来设计海上同时震源并且实现混叠信号分离,同时震源的设计主要通过时间抖动编码方式来实现随机测量,在处理中利用稀疏优化进行信号的反演。LI 等^[11]将稀疏约束与高斯牛顿法相结合,解决在全波形反演过程中采用数据子集产生的人为噪声问题,提高计算效率。OGHENEKOHWO 等^[12]和 WASON 等^[13]将压缩感知应用于时间推移地震。每次采集利用不同的炮点分布通过压缩感知的理论来实现信息的共享,进而节省重复信息的采集。

我们从 2010 年末开始对压缩感知相关技术进行了系统研究,致力于利用压缩感知理论来改变传统地震资料采集方式,提高采集效率与成像精度。随着研究的深入逐渐形成了一整套包括设计、采集与处理的综合技术——Compressive Seismic Imaging(CSI)。该技术主要包括以下 4 个方面。

1) 非规则最优化采样设计(NUOS)。

利用压缩感知理论提出并解决了基于互相关度的最优化问题,在实际采集限制条件下通过迭代产生非规则最优化设计方案^[14-15]。通过求解炮点或检波器点排列互相关度最小化问题,我们可以获得二维或者三维采集最优化设计。该方法避免使用随机观测,利用优化手段排除了传统随机观测设计中的不确定性。在优化过程中可将已知的采集限制条件,例如由输油管道或采油平台所导致的数据采集障碍物等,作为约束计算在内。这样,采集人员可以根据事先制定的方案付诸实际,减少工程意外,以达到理论上的最佳效果。非规则最优化采样设计可灵活应用于海上拖缆、海底电缆或节点、陆上可控震源或炸药震源等采集方式,现有的实践包括了二维、三维或四维采集。

2) 地震信号的稀疏化处理。

提出了基于傅里叶广义窗口变换(GWT)的地震数据稀疏化处理技术^[16]。传统的小波变换采用抽二分样点和局部滤波的迭代算法来分离相邻频带。由于小波基的长度有限,相邻频带之间有重叠,变换后往往出现子带假频问题(subband aliasing)。GWT 巧妙地利用窗口混叠(blending)技术来克服这种现象,实现了高保真的反变换。对实际数据和模拟数据的分析结果表明,相对于 curvelets,地震数据在 GWT 下的表示更加稀疏,具有更好的可压缩性,产生的人为噪声更少。而且, GWT 的复杂度为 $O(KN \log N)$,与快速傅里叶变换接近,远低于 curvelets,计算效率高。这对于 CSI 在大规模高维数据的应用尤为重要。

3) 数据重建。

在稀疏反演的框架下,提出新的非单调交替方向算法(NADA)来解决基于分析的基追踪去噪(analysis-based basis pursuit denoising)问题^[17-18]。该问题在数学上可以表示为:

$$\min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{S}\mathbf{u}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{R}\mathbf{u} - \mathbf{b}\| \leq \sigma \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 和 \mathbf{b} 分别为重建目标信号和采集信号; \mathbf{S} 和 \mathbf{R} 为稀疏基和采样算子; σ 表示采集噪声水平。

NADA 方法将上述复杂的非线性优化问题分解成若干个简单的子问题进行迭代求解,适用于大规模实际数据处理,具有算法复杂度低、抗噪声、收敛稳定、可快速并行等特点。为解决实际采集中炮点和检波器点偏离设计网格的情况,同时提出了插值压缩感知(Interpolated Compressive Sensing)的概念^[19]:在稀疏反演过程中利用 Lagrange 插值方法构造采样算子 \mathbf{R} ,避免使用面元(bin)造成误差,进而提高了方法对不规则网格数据的反演精度。该方法的提出

使 CSI 技术在实际应用中减少了对炮点和检波点的位置限制,极大地降低了海上和陆地采集作业的难度,进一步提高了采集效率。

4) 同时震源分离。

在设计过程中利用 NUOS 技术优化炮点位置,在采集过程中使用多震源独立放炮的方式实现采集效率最大化^[20]。与基于时间抖动或震源编码的同时震源设计方法相比,该技术对震源的激发时间和特征没有限制,作业方式与传统采集基本相同,不增加额外作业难度和安全隐患。同时震源混叠信号的分离同样基于稀疏反演,采用 NADA 算法解决如下优化问题:

$$\min_u \|SW^{-1}u\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|MRu - b\|_2 \leq \sigma \quad (2)$$

式中: M 为混叠算子; W 为权重算子; S, R, u, b 的定义与数据重建中的定义相同。该方法与传统处理手段相结合,分离精度可满足 AVO 分析和四维地震的要求^[21]。该技术既可应用于海上气枪作业,也可应用于陆上可控震源作业。同时震源与压缩感知数据重建技术相结合,可使采集效率/采样率提高 10 倍以上^[22]。

在 2012—2013 年期间,我们进行了 3 次 CSI 技术海上试验,对各项技术风险和作业风险进行了全面的评估,并且在实际数据处理和分析过程中不断改进该技术。从 2014 年开始,CSI 技术在多个油田得到推广应用,在提高采集效率、节省采集费用和改善地震资料品质等方面取得了明显的效果。在 CSI 技术的影响下,更多公司加强了压缩感知相关技术的研究和应用^[23-25]。

2 CSI 技术应用实例

2.1 海底节点应用

CSI 技术首次大规模应用是在北海某油田的三维海底节点采集项目中的应用。该项目计划在 2015 年初采集完成并用于制定后续油田开发计划。考虑作业方和采集队伍时间上的限制,唯一可行的采集时间窗是在 2014 年冬季。由于北海天气和海浪的影响,冬季采集风险很大。在恶劣气象条件下,采集船队为保证安全不得不停工等待。这不但增加了项目成本,更重要的是,如果数据采集无法按时完成将导致后续油田生产开发的滞后。在这种情况下,我们建议利用 CSI 技术提高采集效率,缩短工期。在原采集设计方案基础上,我们对炮点距进行了 NUOS 优化,并采用两条独立震源船进行同时震源采集。修改后的 CSI 设计方案并不增加采集设备和额外的作业难度,震源船之间不要求互相协调放炮的时间与距离,作业方式与传统单船采集相似。在采集过程中,两条震源船完全独立作业。如果一条船遇故障停工,

并不影响另外一条船的继续作业。与协同作业的同时震源相比,这个采集方案有效缩短了总体歇工时间。尽管恶劣的气候造成大量中途歇工,该项目仍然按时完成了采集任务。由于采用双炮船作业,放炮时间缩短了 1/2,而整个工期的缩短又使采集成本降低了 1/4。

在数据处理过程中,受益于算法的稳定与高效,CSI 数据的分离与重建并没有显著增加处理周期,反而将炮点采样率提高了 1 倍。与该区域的传统数据处理结果相比,CSI 数据经过叠前深度偏移后成像质量和精度有明显提高,断层和不整合面刻画得更加清晰。为油田的构造解释和储量评估提供了重要信息。该项目提高了我们对 CSI 技术的信心,也加深了我们对该技术的理解。

2.2 海上拖缆应用

2015 年,我们将 CSI 技术应用于某三维海上拖缆采集项目。该项目是对澳大利亚海域某生产气田重新采集地震数据,以提高成像质量并进行储层精细刻画。拖缆采集受限于方位角和缆距,在联络测线方向采样率较低,浅、中部成像存在严重的航线采集痕迹干扰。传统方法(如多方位角采集)要求对采集区域沿若干方位角多次覆盖,成倍增加了采集时间和成本。为了降低成本,该项目采用窄方位角采集。我们利用 CSI 技术通过优化采集方案,提高联络测线方向采样率以减少航线采集痕迹,进而达到增加成像精度的目的。在接收方面,采用 NUOS 方法优化缆间距并与作业方合作重新部署拖缆相对位置。缆间距由原来的固定 50 m 变成 25~75 m 非均匀分布。在震源方面,采用两组震源交替放炮,并在保证气枪容量的情况下,用 NUOS 优化两组震源炮检距,产生非规则炮点分布。单震源炮距由原来固定的 37.5 m 变成 19~56 m 非均匀分布。该设计方案不改变作业方式,采集与船上质量监控与传统拖缆作业方式相同,不增加作业难度与采集成本。NUOS 设计支持后期数据重建以及混叠信号分离,处理后可增加采样率 5 倍以上,极大提高了采集效率。

为了更好地应用 CSI 技术,数据以连续记录格式输出,并记录每炮的精确放炮时间与位置。在处理上,我们首先进行混叠信号分离与重建,重建后数据拖缆数由 12 条增加为 23 条,同时缆距和炮距分别缩小为 25 m 和 12.5 m。与多数插值方法只增加覆盖次数不增加有效带宽不同,CSI 重建后数据在主测线方向将无假频带宽从 20 Hz 拓展到 60 Hz,在联络测线方向将无假频带宽从 15 Hz 拓展到 30 Hz,与理论带宽吻合。虽然资料处理在数据重建后与传统的处理

流程一致,但是受益于更高的采样率与有效带宽,很多资料处理步骤(如去多次波、去鬼波、叠前偏移等)均取得更好的结果。对比经CSI处理与未经CSI处理的叠前偏移结果,我们可以清晰地观察到CSI技术对减少采集痕迹以及提高成像精度有显著作用。CSI、宽频带处理以及TTI叠前深度偏移技术相结合所提供的最终成像结果均能清晰刻画浅层地质异常、深层的复杂断裂带以及储层,与传统数据结果相比质量显著提高,为该区域下一步生产开发提供了有力支持。

2.3 陆上可控震源应用

阿拉斯加北坡陆上三维地震数据采集于2015年初首次采用了CSI技术。该采集项目的主要目的是在某开发区块获得高质量数据以解决地下塌陷层成像失真的问题,并为储层定量分析提供支持。由于北坡地震资料采集的季节只有每年冬季的3到4个月,而且作业队伍有限,各项目间需协调采集时间。当时唯一可行方案是利用某采集队伍在另外两个三维采集项目当中30天空档期来完成该项目130km²采集。阿拉斯加几十年来的传统采集方式都是利用组合震源多次扫描的方式来增加单炮信噪比,并且通过组合接收阵列强化信号。由于恶劣天气、冻土层、冰湖等因素对数据质量的影响较大,因而高效采集方法一直难以在北坡地区应用。如果该项目采用传统采集方案,在启用12台可控震源的情况下(3~4组),采集效率可达到平均1000~1500炮/天,远不能满足30天采集完130km²的高质量高密度地震数据的要求。

我们利用CSI技术,提出了使用单一震源单次扫描的方式,结合同步震源独立作业进行高密度采集(平均15m炮检距)。不同于其它陆上高效采集方法采用均匀分布炮点,我们通过NUOS方法优化炮检距,对放炮时间和8~12台可控震源相对距离不作限制,后期依靠CSI技术对混叠信号进行高精度分离和重建。在优化炮点位置过程中,将地表限制条件如冻湖、陡峭河岸、北极熊出没地带等无法放炮区域考虑在内,最优化周边覆盖。在接收方面,采用节点设备单点接收连续记录,保证炮点和检波器点动态平衡,提高整体采集效率。节点位置同样进行NUOS优化,非规则分布20~80m,以支持后期数据重建。该采集方案在首次陆上极端环境应用中达到了5000~8000炮/天,在30天内完成了该区块高密度采集任务。与采用传统采集方式的原设计方案相比,提高采集效率5倍,增加数据密度6倍,并做到了全方位角覆盖,为后续的各向异性建模和偏移奠定了基础。

采集方式改变的同时也激发了处理上的新思路

与新方法。传统采集数据单炮信噪比较高,但由于采样率低而导致假频严重,往往模型导向的方法比数据导向的方法更有效。利用CSI技术的高效采集数据虽然单炮信噪比有所降低,但方位角信息丰富,采样率成倍提高,假频也得到明显改善,在这种情况下,许多数据导向的方法变得非常有效,这也给机器学习和深度学习在地震资料上的应用提供了更大的发挥空间。在处理与成像过程中,我们利用全方位角信息进行TTI建模,结合深度偏移,较好地解决了地下塌陷层成像失真的问题,同时成像精度特别是横向分辨率有很大提高。通过对CSI数据AVO近远道集叠加的振幅分析,我们发现对储层顶部以及底部的刻画更加连续,储层边缘更加清晰。该项目展示了CSI技术对陆上采集的巨大帮助。自2015年起我们连续4年在阿拉斯加利用CSI技术进行陆上三维高密度采集,采集效率逐年提高,最高达到20000炮/天。与传统采集相比,数据质量有显著提高。

3 总结与展望

地震资料采集在勘探地球物理中占据重要位置。高品质、高密度的三维地震资料为后续的处理、成像以及解释提供了坚实的信息基础。另一方面,高分辨率的三维地震资料采集又面对很多困难,伴随着人力以及设备的增加和施工周期延长,采集成本变得高昂。在全球油气价格近年持续走低的大环境下,如何在有限的成本下高效地进行三维采集已经成为一个重要的科研课题和生产难题。

压缩感知理论从新的角度阐述了信号与采样之间的关系。当信号中的信息具有一定结构的时候,可以通过设计采样方式,以更低的采样成本来重构原始信号。本文介绍的CSI就是一种基于压缩感知的高精度高效率地震资料采集技术。该技术打破传统的规则采集方式,利用非规则最优化的设计和独立同时震源作业,极大地提高采集效率并缩短采集周期,从而在较低的成本下完成高品质、高采样率的三维地震资料采集。经过多年的摸索,该技术已经用于海底节点、海上拖缆、陆上可控震源和炸药震源等多种地震资料采集方式,均能在有限的采集预算下高质量、安全地完成采集任务。所采集的数据经过叠前深度偏移处理,得到了比传统资料精度更高、质量更好的地下构造成像。

随着新的采集技术的利用,地震数据采集的效率大幅提高,混叠信号分离与高保真数据重建成为地震信号处理过程中的重要技术。我们在稀疏反演的框

架下,用非单调交替方向算法(NADA)进行信号分离与重建,得到的结果保真度较高,在实际应用中能满足 AVO 分析和四维地震的要求。

而经过信号分离与重建后,地震数据增加了十几倍甚至几十倍,这就给勘探处理技术提出了新的课题。我们期待将压缩感知技术同样应用于处理与成像过程中,压缩数据存储量,在提高处理效率和质量的同时能够更加有效地提取地震资料中的地质信息。

致谢:感谢 ConocoPhillips 公司在开发 CSI 技术过程中的大力支持,以及阿拉斯加、英国、挪威、澳大利亚、马来西亚等分公司在 CSI 技术应用中的通力协作。特别感谢 Chuck Mosher 博士在 CSI 项目研发、推广与应用过程中全身心的组织与参与,Geophysical Services 部门的同事在资料采集、数据处理、研发和管理等各方面的辛勤工作和热情帮助。

参 考 文 献

- [1] CANDÈS E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles; exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509
- [2] CANDÈS E, TAO T. Near optimal signal recovery from random projections; universal encoding strategies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425
- [3] DONOHO D. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306
- [4] HENNENFENT G, HERRMANN F J. Simply denoise; wavefield reconstruction via jittered undersampling[J]. *Geophysics*, 2008, 73(3): V19-V28
- [5] HERRMANN F J. Randomized sampling and sparsity: getting more information from fewer samples[J]. *Geophysics*, 2010, 75(6): WB173-WB187
- [6] CANDÈS E, DONOHO D. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise c_2 singularities[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2004, 57(2): 219-266
- [7] MOLDOVEANU N. Random sampling: A new strategy for marine acquisition[J]. *Expanded Abstracts of 80th Annual Internat SEG Mtg*, 2010: 51-55
- [8] NEELAMANI R, KROHN C E, KREBS J R, et al. Efficient seismic forward modeling using simultaneous random sources and sparsity[J]. *Geophysics*, 2010, 75(6): WB15-WB27
- [9] MA J, PLONKA G, CHAURIS H. A new sparse representation of seismic data using adaptive easy-path wavelet transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 540-544
- [10] MANSOUR H, WASON H, LIN T, et al. Randomized marine acquisition with compressive sensing[J]. *Geophysical Prospecting*, 2012, 60(4): 648-662
- [11] LI X, ARAVKIN A Y, VAN LEEUWEN T, et al. Fast randomized full-waveform inversion with compressive sensing[J]. *Geophysics*, 2012, 77(3): A13-A17
- [12] OGHENEKOHWO F, WASON H, ESSER E, et al. Low-cost time-lapse seismic with distributed compressive sensing, part 1: exploiting common information among the vintages[J]. *Geophysics*, 2017, 82(3): P1-P13
- [13] WASON H, OGHENEKOHWO F, HERRMANN F J. Low-cost time-lapse seismic with distributed compressive sensing, part 2: impact on repeatability[J]. *Geophysics*, 2017, 82(3): P15-P30
- [14] MOSHER C C, KESKULA E, KAPLAN S T, et al. Compressive seismic imaging[J]. *Expanded Abstracts of 82nd Annual Internat SEG Mtg*, 2012: 1460-1464
- [15] MOSHER C C, LI C, MORLEY L C, et al. Increasing the efficiency of seismic data acquisition via compressive sensing[J]. *The Leading Edge*, 2014, 33(4): 386-388, 390-391
- [16] MOSHER C C. Generalized windowed transforms for seismic processing and imaging[J]. *Expanded Abstracts of 82nd Annual Internat SEG Mtg*, 2012: 1196-1200
- [17] LI C, KAPLAN S T, MOSHER C C. An efficient variable-splitting multiplier method for compressive sensing seismic data reconstruction[J]. *Expanded Abstracts of 82nd Annual Internat SEG Mtg*, 2012: 1288-1292
- [18] LI C, MOSHER C C, SHAN S, et al. Marine towed streamer data reconstruction based on compressive sensing[J]. *Expanded Abstracts of 83rd Annual Internat SEG Mtg*, 2013: 3597-3602
- [19] LI C, MOSHER C C, KAPLAN S T. Interpolated compressive sensing for seismic data reconstruction[J]. *Expanded Abstracts of 82nd Annual Internat SEG Mtg*, 2012: 1335-1340
- [20] MOSHER C C, LI C, MORLEY L C, et al. Non-uniform optimal sampling for simultaneous source survey design[J]. *Expanded Abstracts of 84th Annual Internat SEG Mtg*, 2014: 105-109
- [21] LI C, MOSHER C C, JI Y, et al. A multi-stage inversion method for simultaneous source deblending of field data[J]. *Expanded Abstracts of 84th Annual Internat SEG Mtg*, 2014: 3610-3615
- [22] BROWN L, MOSHER C C, LI C, et al. Application of compressive seismic imaging at Lookout Field, Alaska[J]. *The Leading Edge*, 2017, 36(8): 670-676
- [23] STORK C, BROOKES D. The decline of conventional seismic acquisition and the rise of specialized acquisition; this is compressive sensing[J]. *Expanded Abstracts of 84th Annual Internat SEG Mtg*, 2014: 4386-4392
- [24] CAMPAN X, TANG Z, JAMALI-RAD H, et al. Sparse seismic wavefield sampling[J]. *The Leading Edge*, 2017, 36(8): 654-660
- [25] OU S, YANG X, SZUREK G, et al. Choosing deblending strategies for simultaneous source data acquisition[J]. *Expanded Abstracts of 87th Annual Internat SEG Mtg*, 2017: 52-56