一种宽带噪声信号的深海会聚区判别方法

王良^{①*}, 高大治^①, 王宁^{①②}, 郭良浩^③

① 中国海洋大学海洋技术系, 青岛 266100;

② 海洋科学与技术青岛协同创新中心, 青岛 266071;

③ 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190

*联系人, E-mail: hdwangliang@126.com

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-04-21; 网络出版日期: 2016-08-11

摘要 当目标位于不同会聚区时, 其到达接收器的信号具有很强的相似特征, 传统的匹配场处理模糊度表面中在不同会聚区会出现高旁瓣, 当存在失配时还会导致定位错误, 从而带来了难以识别目标所在会聚区的问题. 本文针对会聚区判别模糊问题, 根据声源在空间分布上的稀疏性, 利用不同会聚区信号在频域上的起伏特征差异, 基于压缩感知理论, 提出了基于 l_1 优化匹配处理的会聚区判别方法. 对比传统匹配场处理方法, 该方法具有高分辨性能, 在有限的采样数据条件下, 能有效抑制会聚区判别的旁瓣模糊问题. 计算机仿真和海上拖线阵实验数据处理验证了该方法的有效性.

关键词 深海, 会聚区判别, 匹配场处理, 压缩感知

PACS: 62.50.+p, 47.40.-x, 43.40.Jc

在深海环境下, 当声源和接收器位于深度较浅的表层附近时, 在水声探测问题中会经常遇到会聚区的情况. 利用会聚区可以在较远的距离上发现目标, 对实现声呐远程探测具有十分重要的意义, 因而从20世纪60年代起, 有关会聚区声场特性的理论和实验研究一直受到高度关注^[1-5]. 张仁和^[2]利用WKBZ方法给出了会聚区声场的完整理论, 可快速而准确地预报会聚区声场, 而匹配场(Matched Field Processing, MFP)作为一种水声定位方法, 在深海远程探测中也进行了较多的实验研究^[6-9], 在这些实验结果分析中, 由于会聚区的存在和失配因素引起的会聚区判别模糊问题逐渐引起重视^[7,9]. 从简正波理论角度, 会聚区是由各号简

正波同相叠加而成, 不同会聚区的声场在局部区域具有很强的相似性, 在利用匹配场处理方法对未知目标定位时, 在非目标所在的会聚区区域将会出现较高的旁瓣, 从而导致会聚区判别模糊, 即难以判断目标位于第几会聚区, 这也成为制约被动声呐远程探测应用中的一个重要问题.

近年, 由Donoho等人^[10,11]提出的压缩感知理论(Compressive Sensing, CS)指出了一条从低分辨观测中恢复高分辨信号的有效途径: 利用变换空间描述信号, 当信号满足稀疏或可压缩性时, 可以将信号的采样转变成信息的采样, 通过求解一个优化问题即可从少量的观测数据中恢复原始信号. 目前, 该理论已在阵列信

引用格式: 王良, 高大治, 王宁, 等. 一种宽带噪声信号的深海会聚区判别方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094312
Wang L, Gao D Z, Wang N, et al. A discrimination method for convergence zones using wideband noise signal (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094312, doi: [10.1360/SSPMA2016-00083](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00083)

号处理^[12,13]、图像超分辨重建^[14]等领域得到了广泛应用,也为深海会聚区判别提供了一种新的思路. 相比于整个搜索区间,目标是一个“稀疏信号”,本文将探讨一种基于压缩感知理论的匹配场处理方法(Compressive Matched-Field Processing, CMFP),将会聚区判别问题转化为空间稀疏信号的重建问题,在有限的采样数据条件下,利用压缩感知理论的超分辨性能,来改善会聚区判别的能力.

1 问题的描述

作为会聚区判别的依据,本节首先讨论会聚区声场的相似性和差异性. 根据简正波理论,简谐点源的简正波声场为

$$p(r, z_s, z) = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} \sum_{n=0}^N \psi_n(z_s)\psi_n(z) \frac{e^{-ik_n r}}{\sqrt{k_n}}, \quad (1)$$

其中, z_s 与 z 为发射和接收深度, r 为水平距离, k_n 为水平波数, $\psi_n(z)$ 为振幅函数. 会聚区产生的条件为某一范围内相邻简正波的水平波数之差能保持相对稳定的常数:

$$|k_{n+1} - k_n| \approx C, \quad (2)$$

则在某一水平距离 R 上有

$$|k_{n+1}R - k_n R| \approx 2\pi, \quad (3)$$

此时,在这一距离范围内,简正波中的某一子集合同相叠加从而形成周期性的会聚. 会聚区的这种周期性是否决定了会聚区是不可区分的? 实际上,不同会聚区的声场是存在一定的差异性起伏的. 为描述这种差异性,我们将水平波数进行级数展开,并保留至二阶项^[2]

$$k_n \approx k_0 - An - B\frac{n^2}{k_0}, \quad (4)$$

其中, $A = 2\pi/R$, $B \propto A^2$. 将(4)式代入(1)式得到声场的近似描述为

$$p(r, z_s, z) \approx \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r k_0}} \sum_{n=0}^N \psi_n(z_s)\psi_n(z) e^{-iAnr - iBn^2 r/k_0}, \quad (5)$$

由此定义会聚函数

$$f_c(r, z_s, z) = \sum_n \psi_n(z_s)\psi_n(z) e^{-iAnr - iBn^2 r/k_0}, \quad (6)$$

该式可以较为直观地反映会聚区声场的相似性和差异

性: 指数项 e^{-iAnr} 对简正波号数的离散积分将会在 R 的整数倍距离处出现峰值,使得会聚区声场具有严格的周期性,此时会聚区从物理上是不可分的;指数项 $e^{-iBn^2 r/k_0}$ 可以看作由距离和频率决定的相位调制项,使得所有相位差小于 $\pi/2$ 的各号简正波同相相加,由于各号简正波之间的干涉波长不同,随着距离的增加,在不同的会聚区内引起声场起伏和会聚区拓宽,从而使不同的会聚区声场在距离和频率分布上呈现一定的差异性;振幅函数 $\psi_n(z_s)\psi_n(z)$ 是由深度和频率决定的幅值调制项,由于各号简正波在某深度和频率上的激发强度不同,使会聚区内的声场出现起伏,该起伏的大小取决于收发深度和声源频率,深度越小,频率越低,该起伏越不明显. 图1给出了不考虑海面 and 海底反射下的水平方向声场分布,其中收发深度均在150 m, 频率为150 Hz, 海深5000 m, 可以看到在水平方向上存在明显的会聚区分裂和展宽,但由于会聚区宽度较大(一般为跨度的10%),若要观测到整个会聚区的起伏,需要至少几公里的观测长度. 而在实际有限的带宽和阵长条件下,在不同会聚区的局部区域仍然具有较强的相似性,此时利用基于全局信息的最小方差匹配方法进行匹配定位时,在非目标会聚区区域将出现较高的旁瓣. 换言之,采样信息不足和辨识度不够是利用匹配场定位时产生高旁瓣的主要因素.

2 基于压缩感知理论的会聚区判别方法

2.1 压缩感知原理

与基于能量的最小方差处理方法不同,压缩感知

图1 水平方向上的声场起伏
Figure 1 Acoustics field fluctuation in horizontal direction.

从信号的稀疏重构方面, 利用 l_1 优化方法寻求满足测量方程限定的最稀疏解, 以获得高分辨性能.

由压缩感知理论, 当信号在某种变换域内能够表现出足够稀疏或可压缩时, 可以由一组正交基线性表示为

$$Y = \Psi X, \quad (7)$$

其中, Ψ 为 $N \times N$ 维的正交基变换矩阵, Y 为 $N \times 1$ 的原始信号, X 为信号 Y 在变换矩阵 Ψ 上的 $N \times 1$ 维投影向量, 若 X 中只含有 k 个不为零的元素($k \ll N$), 则称为 k 稀疏, 即 X 具有稀疏/可压缩性质. 利用该稀疏特性, 如果能够准确的确定 k 个非零系数的位置, 则只需要 $M > k$ 个测量值即可恢复原始信号. 理论表明^[10], 利用与变换矩阵 Ψ 不相关的 $M \times N$ 维($M \ll N$)观测矩阵 ϕ 可以最大概率的恢复原始信号. 压缩处理过程可以描述为

$$P = \phi Y = \phi \Psi X = AX, \quad (8)$$

其中, P 为 $M \times 1$ 维观测向量, $A = \phi \Psi$ 为 $M \times N$ 压缩感知矩阵, 且 A 中的各列互不相关. 对于原本就是稀疏的信号, 在观测矩阵对信号进行采样时无需同时对信号进行稀疏化, 此时的压缩感知矩阵 A 可以直接由观测矩阵 ϕ 取代. 信号的重建可以通过 l_1 范数优化方法寻求满足(8)式测量方程的最稀疏解获得

$$\arg \min \|X\|_1 \text{ subject to } P = AX. \quad (9)$$

2.2 稀疏重建的会聚区判别模型

在深海进行远程目标被动探测时, 接收阵列通常为水平拖曳阵, 声源为宽带辐射噪声, 对于会聚区判别问题, 主要关心目标的距离信息, 因此本文暂不考虑目标的深度信息. 若将搜索距离分为 N 个网格, 则真实声源的位置只存在于某一个网格上, 因此声源在空间上具有1-稀疏性质. 考虑到(6)式中的指数项中频率变化或距离变化均会引起声场起伏, 这里采用实测数据的频谱作为采样数据, 构造 $M \times 1$ 维观测向量

$$P = [p(r, f_1), p(r, f_2), \dots, p(r, f_M)]^T, \quad (10)$$

在不考虑噪声的条件下, 该观测向量可以由格林函数线性表示, 其稀疏表述为

$$P = GX, \quad (11)$$

其中,

$$G = \begin{bmatrix} g(f_1, r_1), g(f_1, r_2), \dots, g(f_1, r_N) \\ g(f_2, r_1), g(f_2, r_2), \dots, g(f_2, r_N) \\ \vdots \\ g(f_M, r_1), g(f_M, r_2), \dots, g(f_M, r_N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

为 $M \times N$ 维观测矩阵, $g(f_m, r_n)$ 表示在频率 f_m 和距离 r_n 上的格林函数. X 表示在距离搜索网格 $[r_1, r_2, \dots, r_N]$ 上的声源强度, 理论上该向量中仅包含一个非零元素. 由于会聚区形成距离较远, 搜索距离网格可以设置较多, 在给定带宽条件下, 信号的窄带个数 $M \ll N$, 此时观测向量 P 本身可以看作稀疏信号, 观测矩阵 G 即为压缩感知矩阵, X 为待求解向量. 因此匹配场定位问题可转换为稀疏信号重建问题, 如图2所示. 根据(9)式求得每个搜索距离网格上的源分布情况, 即可获得声源的距离信息.

由(12)式构造的观测矩阵是过完备的, 求解 X 的过程即在过完备的基函数中寻找能够描述原始信号的最稀疏形式, 即期望用尽量少的基函数来准确地描述原始信号以获取信号的稀疏结构性, 因此它能捕捉信号在完备/欠完备的基函数下不能分辨的细节特征, 进而具有高分辨性能.

在实际应用中, 不可避免地会引入噪声和环境参数失配, 此时 X 的求解可将(9)式模型作适应性改进, 在 l_1 范数上加一个二次不定测量来解决:

$$\arg \min \|X\|_1 \text{ subject to } \|P - GX\|_2 \leq \varepsilon, \quad (13)$$

其中, ε 为对模型失配和噪声的容忍度, 可根据噪声强度和模型匹配情况适当选择. (13)式所描述的优化模型实际上是一个Basis Pursuit De-Noising算法求解过程, 可通过LASSO方法^[15]实现.

图2 稀疏重建示意图
Figure 2 Schematic diagram for sparse reconstruction.

3 计算机仿真

利用计算机仿真验证算法的有效性, 并与常规匹配场处理方法对比.

仿真实验中, 考虑水平不变波导, 海洋环境参数设置如图3所示. 其中水深5000 m, 收发深度均位于130 m. 声源带宽为200–500 Hz, 窄带间距为4 Hz, 共 $M = 76$ 个窄带.

不考虑海面发射和海底反射, 利用Krakenc计算得到声场空频分布如图4所示. 从图4可以看出, 第一会聚区和第二会聚区声场具有很强的相似性, 同时在频率和距离方向也存在一定的差异性起伏.

图3 仿真环境示意图
Figure 3 Schematic diagram for simulation.

图4 会聚区声场空频分布. (a) 第一会聚区; (b) 第二会聚区
Figure 4 Acoustic field distribution of space-frequency in (a) the first convergence zone; (b) the second convergence zone.

仿真一: 噪声条件下的会聚区判别性能对比

选取第一会聚区56 km处的频谱作为采样数据 $\mathbf{P}$, 如图4中的虚线所示. 分别采用常规匹配场处理方法和CMFP方法进行会聚区判别处理. 为保证CMFP性能, 水平方向搜索区间为30–130 km, 网格间隔100 m, 共设置 $N = 1000$ 个网格. 利用(1)式计算每个网格上的各个窄带的格林函数构成 $M \times N$ 维观测矩阵 $\mathbf{G}$ 和拷贝场向量. CMFP采用(13)式优化模型, 并利用CVX工具箱求解向量 $\mathbf{X}$. 常规匹配场处理采用Bartlett宽带非相干模型

$$B(r) = \frac{\left| \sum_{j=1}^M p(r, f_j) p(r_0, f_j) \right|}{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^M |p(r, f_j)|^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |p(r_0, f_j)|^2 \right]}}, \quad (14)$$

其中, $p(r, f_j)$ 为距离 r, f_j 处的拷贝场向量, $p(r_0, f_j)$ 为距离56 km处的计算声场.

图5给出了在信噪比0 dB条件下CMFP和MFP的结果对比.

从图中可以看出, 在该信噪比条件下, CMFP方法仍然能清晰地分辨出目标实际所在位置, 而MFP方法在非目标距离处具有较高的旁瓣, 表明了CMFP具有更好的分辨性能.

仿真二: 失配条件下的会聚区判别性能

相比于浅海, 深海会聚区的贡献主要来自于水体汇聚模态, 海底和海面发射模态经远距离衰减后几乎

图5 信噪比0 dB时CMFP (a) 和MFP (b) 处理结果对比
Figure 5 Results of CMFP (a) and MFP (b) under the condition of SNR=0 dB.

可以忽略, 即海底参数的设置对拷贝场的计算影响较小, 这里环境失配主要考虑声速剖面的变化. 声波在远距离传输过程中, 表层的声速剖面受温度等因素的影响具有一定的起伏, 这种起伏在实际应用中难以准确获得, 一般仅利用接收位置处的声速剖面计算拷贝场, 从而引起失配. 考虑图6所示的两种声速剖面, 该声速剖面为实测相距60 km时不同区域的声速分布, 其中同一深度声速的最大差为5 m/s.

取声速剖面1计算得到的第一会聚区内53 km处的频谱作为采样数据, 声速剖面2计算得到的声场作为拷贝场. CMFP和MFP处理结果如图7所示.

图6 声速剖面图
Figure 6 Sound speed profile.

图7 失配条件下CMFP和MFP处理结果对比. (a) CMFP; (b) MFP
Figure 7 Results of CMFP and MFP under the condition of mismatch. (a) CMFP; (b) MFP.

从该结果中可以看出, 失配对CMFP和MFP均有一定的影响. 由于MFP本身具有很高的旁瓣, 在失配条件下, 难以区分目标位于第一会聚区. 而失配对CMFP的主要影响在与感知矩阵中引入了一定的误差, 使得第二会聚区也产生了旁瓣, 但仍然可以准确地区分目标位于第一会聚区. 文献[16]已证明, 在最小二乘失配范围不是很大的情况下, (13)式给出的优化模型具有一定的鲁棒性, 即其恢复数据不会有太大变化, 仿真结果也验证了该结论.

4 实验数据处理

数据来源于2014年7月某深海实验. 实验区域平均海深为4300 m, 收发深度均位于130 m深度附近. 声源为260–360 Hz调频信号, 由发射船搭载漂浮, 接收端为等间隔水平拖线阵, 由接收船拖曳匀速远离发射船并穿越第一会聚区, 记录每一时刻的接收信号, 通过波束形成得到目标的时域波形, 并进行傅里叶变换, 得到穿越第一会聚区的时间-频率域(t - w)声场分布, 利用GPS记录的距离将时间坐标转化为空间坐标后得到实测第一会聚区的 r - w 分布如图8所示.

利用接收船处测量的声速剖面, 通过KrakenC计算得到的第一和第二会聚区声场空频分布如图8所示.

对比图8和9, 第一会聚区的计算声场同实测声场吻合较好, 同时计算声场的第一会聚区53 km附近和第二会聚区106 km附近声场具有较强的相似性, 选取图8中虚框所示的区域作为实测声场, 以此进行会聚区判别. 其中每个距离上进行单独检测, 共检测700

图8 实测第一会聚区声场的空频分布
Figure 8 Acoustics field distribution of space-frequency processing by measured data.

图9 计算声场空频分布. (a) 第一会聚区; (b) 第二会聚区
Figure 9 Acoustic field distribution of space-frequency by Kraken program. (a) The 1st convergence zone; (b) the 2nd convergence zone.

次, 检测结果如图10所示.

在该结果中, CMFP共检测成功603次, 检测成功率为86%, 而MFP共检测成功407次, 检测成功率为58%. 表明CMFP方法对会聚区的判别较MFP方法得到有效改善, 验证了CMFP方法的可行性.

5 结论

会聚区声场具有一定的差异性, 在只能够获得部分声场信息的条件下, 本文从声源空间分布的稀疏性上, 提出了一种基于稀疏重建的会聚区判别方法, 利

图10 实验数据处理结果. (a) CMFP; (b) MFP
Figure 10 Results of experiment data processing. (a) CMFP; (b) MFP

用压缩感知的 l_1 优化算法, 有效抑制了常规匹配场处理方法在非目标会聚区旁瓣过高的问题. 在一定的噪声和失配条件下, CMFP方法较MFP均表现出了良好的检测性能.

本文所采用的实验数据处理中, 声源为已知的脉冲信号, 在接收端具有较高的信噪比, 且收发深度均为已知, 对于噪声目标和其他失配条件下CMFP的检测性能尚需进一步的验证.

致谢 作者感谢参与海上实验的全体工作人员, 是他们的一丝不苟、辛勤付出为本文提供了详实的实验数据.

参考文献

- Hale F E. Long-range sound propagation in the deep ocean. *J Acoust Soc Am*, 1961, 33: 456
- Zhang R H. The reversal point of underwater sound channel in the convergence zone of normal mode theory (in Chinese). *Acta Acust*, 1980, 1: 28–41 [张仁和. 水下声道中的反转点会聚区简正波理论. *声学学报*, 1980, 1: 28–41]
- Heaney K D, Campbell R L, Murray J J, et al. Detection performance modeling and measurements for convergence zone (CZ) propagation in deep water. *J Acoust Soc Am*, 2011, 130: 2530
- Song H C, Hodgkiss W S. Diversity combining for long-range acoustic communication in deep water. *J Acoust Soc Am*, 2012, 132: EL68
- Heaney K D, Campbell R L, Baggeroer A B, et al. Towed array propagation measurements and modelling in the Philippine Sea. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 3353
- Yang T C. A method of range and depth estimation by modal decomposition. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82: 1736–1745
- Tran J M Q D. Experimental observation of temporal fluctuations at the output of the conventional matched-field processor. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89: 2291–2302
- Westwood E K. Broadband matched-field source localization. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91: 2777–2789
- Chen L R, Peng Z H, Wang G X, et al. Periodic analogical structure in the source localization in the reflection area of the deep ocean (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 153–158 [陈连荣, 彭朝辉, 王光旭, 等. 深海海底反射区声源定位中的周期相似结构. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: 153–158]

- 10 Donoho D L. Compressed sensing. [IEEE Trans Inform Theor](#), 2006, 52: 1289–1306
- 11 Tsaig Y, Donoho D L. Breakdown of equivalence between the minimal-norm solution and the sparsest solution. [Signal Proc](#), 2006, 86: 533–548
- 12 Xenaki A, Gerstoft P, Mosegaard K. Compressive beamforming. [J Acoust Soc Am](#), 2014, 136: 260–271
- 13 Mantzel W, Romberg J, Sabra K. Compressive matched-field processing. [J Acoust Soc Am](#), 2012, 132: 90–102
- 14 Shechtman Y, Gazit S, Szameit A, et al. Super-resolution and reconstruction of sparse images carried by incoherent light. [Opt Lett](#), 2010, 35: 1148
- 15 Tibshiran R. Regression shrinkage and selection via lasso. [J Stat Soc](#), 1996, 58: 267–288
- 16 Rosenbaum M, Tsybakov A B. Sparse recovery under matrix uncertainty. [Ann Statist](#), 2010, 38: 2620–2651

A discrimination method for convergence zones using wideband noise signal

WANG Liang^{1*}, GAO DaZhi¹, WANG Ning^{1,2} & GUO LiangHao³

¹ *Department of Marine Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

² *Qingdao Collaborative Innovation Center of Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;*

³ *State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

The strong similarity of signals from different convergence zones in deep water brings about high sidelobes in the ambiguity surface using the conventional match-field processing, which leads to localization ambiguity while the target is located in convergence zone. Aimed at the question, this paper presents a discriminate approach of convergence zone based on the l_1 -optimization match-field processing based on compressive sensing theory, which takes advantage of the difference in fluctuating features of received signals at different convergence zones in frequency-domain due to the sparsity of space distribution of sound source. Compared with the conventional match-field processing, the approach has a high-resolution performance and can efficiently suppress side-lobe ambiguity problem under the condition of limited sampling. The validity of the approach is verified by means of simulation and the experimental data analysis of towed array.

deep water, convergence zone discrimination, matched field processing, compressive sensing

PACS: 62.50.+p, 47.40.-x, 43.40.Jc

doi: [10.1360/SSPMA2016-00083](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00083)