

采用时域联合稀疏恢复的多输入多输出水声信道压缩感知估计

周跃海 吴燕艺 陈东升 童峰

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

摘要:多输入多输出(MIMO)水声通信技术可以在极其有限的水声信道频带资源内提高信道容量,但多径和同道干扰的同时存在,使传统信道估计算法如最小二乘算法、压缩感知估计算法的性能急剧下降。考虑到通信数据块间水声信道多径结构存在一定的相关性,该文利用这种数据块间多径结构的时间域相关性建立水声 MIMO 信道的时域联合稀疏模型,并利用同步正交匹配追踪算法进行多个数据块联合稀疏恢复信道估计,提高 MIMO 信道多径稀疏位置的检测增益并抑制同道干扰,提高水声 MIMO 信道的估计性能。仿真和 MIMO 水声通信海试实验表明了所提方法的有效性。

关键词:MIMO 水声信道估计;同道干扰;分布式压缩感知;同步正交匹配追踪

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)08-1920-08

DOI: 10.11999/JEIT151158

Compressed Sensing Estimation of Underwater Acoustic MIMO Channels Based on Temporal Joint Sparse Recovery

ZHOU Yuehai WU Yanyi CHEN Dongsheng TONG Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) under water acoustic communication is capable of improving the channel capacity in extremely limited bandwidth. However, the performance of traditional channel estimation algorithms, such as Least Squares (LS) method, Compressed Sensing (CS) method decreases rapidly because of the simultaneous presence of the Co-channel Interference (CoI) and multipath. As the sparse multipath structures between adjacent data blocks exhibit temporal correlation features, in this paper, the temporal correlation of sparse multipath structures is exploited to establish temporal joint sparse MIMO channel estimation model, and the Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit (SOMP) algorithm is utilized for compressed sensing estimation of MIMO channels. Simulation and sea trial results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: MIMO channel estimation; Co-channel interference; Distributed compress sensing; Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit (SOMP)

1 引言

水声通信技术可用于海洋资源开发、海洋环境立体监测、海洋组网通信等,在近年来得到了广泛的应用和研究。多输入多输出水声通信技术可通过信道空间复用获得极高的频谱利用率,在水下带宽极其有限的条件下显著提高通信速率,从而实现水下高速通信,是一种极具有应用前景的技术手段^[1-4]。但水声信道的双重扩展(时延扩展和多普勒扩展)给高速水下通信带来了严峻的挑战^[5]。

利用信道估计方法获取 MIMO 信道特性后可以采用时间反转、信道均衡等信道匹配方式来改善 MIMO 通信性能。文献[1]在水声 MIMO 通信系统采用低复杂度的 Turbo 均衡抑制码间干扰,实验结果表明软判决均衡在水下 MIMO 通信具有较高的鲁棒性。文献[2]在水声 MIMO 通信系统提出最小迭代稀疏学习的信道估计算法,并采用基于符号检测的线性最小均方误差方案。文献[3,4]在 MIMO 水声通信系统中采用基于最小均方误差的信道估计和 Turbo 均衡方案,并通过海试实验表明了方案的有效性。

多通道时间反转可以利用空间分集提高水声 MIMO 通信系统的接收增益。文献[6]提出一种低复杂度的时间反转 MIMO 接收机,分别采用正交匹配追踪和最小二乘信道估计算法,周期性更新信道特性用于多通道时间反转处理,合并后采用判决反馈

收稿日期:2015-10-16;改回日期:2016-04-27;网络出版:2016-06-12

*通信作者:童峰 ftong@xmu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(11274259, 11574258),福建省自然科学基金(2015J01172)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (11274259, 11574258), The Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2015J01172)

均衡实现信号的解调。

因此,信道估计质量影响着水声 MIMO 通信系统的性能。与单发射系统相比, MIMO 通信系统不但存在多径、时变等水声信道恶劣传输特性,而且存在不同发射阵元在同一接收阵元所造成的同道干扰(Co-channel Interference, CoI),导致传统 MIMO 信道估计方法性能不可避免地下降,对高性能 MIMO 信道估计提出了极大的挑战。

针对水声信道多径分布具有典型的稀疏特性,近年快速发展的压缩感知(Compressed sensing, CS)理论可将水声信道估计转换为稀疏恢复问题^[6,7],可有效利用水声信道多径稀疏特性提高信道估计性能,在非零抽头有效地抑制了估计噪声;同时,压缩感知信道估计算法可放松 MIMO 信道估计模型中非欠定方程要求训练序列的长度要求,也就是放宽了对训练序列长度的要求。文献[7]表明,利用稀疏特性可获得比传统信道估计算法如 LS 更好的估计性能。

在压缩感知估计方法可获得性能改善的基础上,考虑到对于缓变水声信道,接收到的通信数据块之间水声信道多径稀疏结构具有一定的相关性,这种多径稀疏结构在时域存在的相关性为进一步改善水声 MIMO 信道压缩感知估计的性能提供了可能。文献[8]针对多个信号稀疏性具有相关的现象提出了分布式压缩感知(Distributed Compressed Sensing, DCS)理论,通过利用多个信号的共同稀疏性进行联合重构可进一步提高稀疏重构性能。文献[9]利用分布式压缩感知在 OFDM 系统进行信道估计,实验表明分布式压缩感知信道估计算法可以提高时-频双重选择性衰落信道的估计精度,抑制子载波间的干扰。文献[8]针对典型的分布式稀疏信号提出 3 种联合稀疏模型(Joint Sparsity Model, JSM),其中, JSM1 模型中每个信号由稀疏共同部分和特有部分组成; JSM2 模型中信号间具有相同的稀疏支撑集而只是非零系数不同, JSM3 模型中信号由非稀疏共同部分和稀疏独立部分组成。上述 3 种模型代表了 3 种不同类型的物理场景,其中 JSM2 模型已应用于无线传感器网络簇头至各节点的信道估计^[10]。分布式压缩感知理论在无线网络通信^[10-12]中已得到较为广泛的研究应用,但在水声 MIMO 通信领域尚不多见。文献[13]利用 MIMO 水声信道多径稀疏结构存在的空间相关性,在经典联合稀疏模型的基础上对 MIMO 观测矩阵进行重组,建立分布式压缩感知 MIMO 信道估计模型进行联合重构。但是,在水声信道垂直相关性较差的情况下,该方案获得的空间联合稀疏增益将明显下降。

考虑到通信数据块间 MIMO 信道多径稀疏结

构存在的时域相关性,本文在分布式压缩感知的框架下将 MIMO 水声信道估计转换成 JSM2 模型下的时域联合稀疏恢复问题,并设计了一种联合数据块分布式压缩感知算法(Cross-Blocks Distributed Compressed Sensing, CBDCS)利用数据块间多径稀疏特性的时域相关性进行联合稀疏恢复信道估计,提高了 MIMO 水声信道的多径稀疏位置检测增益,并可抑制同道干扰的影响。仿真实验和海试实验表明了该方案的有效性。

2 系统模型

2.1 水声 MIMO 通信系统模型

具有 N 个发射阵元和 M 个接收阵元的水声 MIMO 通信的接收信号可写为^[6]

$$y_m(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=0}^{L-1} s_n(k-l)h_{n,m}(k,l) + w_m(k) \quad (1)$$

其中, $y_m(k)$, $w_m(k)$ 分别为第 m 通道的接收信号和加性噪声, $s_n(k)$, $h_{n,m}(k,l)$ 分别为第 n 通道的发射信号、从 n 到 m 通道的信道冲激响应。 k 为观测时间坐标, l 为时延时间。假设在 P 个采样点内信道保持稳定,即 P 为信道估计训练序列的长度。则可将式(1)写为

$$\mathbf{y}_m = \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_n \mathbf{h}_{n,m} + \mathbf{w}_m \quad (2)$$

其中, $P \times L$ 阶 Toeplitz 结构矩阵 \mathbf{A}_n 为

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} s_n[k+L] & s_n[k+L-1] & \cdots & s_n[k+1] \\ s_n[k+L+1] & s_n[k+L] & \cdots & s_n[k+2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_n[k+L+P-1] & s_n[k+L+P-2] & \cdots & s_n[k+P] \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m &= [y_m(k+L) \ y_m(k+L+1) \ \cdots \ y_m(k+L+P-1)]^T \\ \mathbf{h}_{n,m} &= [h_{n,m}(k) \ h_{n,m}(k+1) \ \cdots \ h_{n,m}(k+L-1)]^T \\ \mathbf{w}_m &= [w_m(k+L) \ w_m(k+L+1) \ \cdots \ w_m(k+L+P-1)]^T \end{aligned} \quad (4)$$

式(2)可进一步写成

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{A} \mathbf{h}_m + \mathbf{w}_m \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2 \ \cdots \ \mathbf{A}_N]$, $\mathbf{h}_m = [h_{1,m} \ h_{2,m} \ \cdots \ h_{N,m}]^T$ 。

式(5) MIMO 信道估计问题可以采用 LS 方法或者 MMSE 方法进行求解。对于传统的 LS 信道估计或者 MMSE 信道估计,其训练序列的长度必须满足大于信道响应的长度,避免解欠定方程造成信道估计精度下降,甚至造成错误估计;同时,在时延扩展严重且发射通道较多的情况下,要求较长的训练

序列长度，不但增加了系统的开销，而且增加了计算复杂度。此外，在时变条件下难以保证信道的稳定性。

水声信道是典型的稀疏信道，多径能量主要分布在若干个抽头，具有显著的稀疏性。可利用压缩感知算法进行水声信道估计。建立压缩感知信道估计模型

$$\hat{h} = \arg \min \|h\|_1, \text{ s.t. } y = Ah \quad (6)$$

式(6)称为压缩感知重构，训练序列 y 的长度可小于信道 h 的长度^[14]，由于利用稀疏特性放宽了对训练序列长度的限制，从而减少了系统的开销。在MIMO水声通信系统中，接收到的信号不但存在码间干扰而且存在同道干扰，传统的正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)信道估计算法性能将下降，本文采用联合稀疏恢复信道估计算法可提高MIMO水声通信系统的信道估计性能。

2.2 分布式压缩感知信道估计

针对多个信号稀疏分布具有相关性的现象，分布式压缩感知技术在经典压缩感知理论的基础上可利用共同稀疏性提高稀疏恢复性能^[8]。对于接收到的水声通信信号，各数据块间的多径结构存在较强的时间相关性，具体表现为所有数据块或其中某些数据块间某些多径位置相同，即具有相同的稀疏支撑集而只是幅度系数不同，符合经典DCS理论中第2联合稀疏模型(Joint Sparsity Models 2, JSM2)。此时可进一步利用这种稀疏相关特性提高稀疏恢复概率，或者可采用较小的训练序列长度 P 以减小系统训练序列开销，提高通信效率。

JSM2 模型下第 i 个数据块的冲激响应 h_i 可

$$X_i = \begin{bmatrix} s_n[k+L+iB] & s_n[k+L-1+iB] & \cdots & s_n[k+1+iB] \\ s_n[k+L+1+iB] & s_n[k+L+iB] & \cdots & s_n[k+2+iB] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_n[k+L+P-1+iB] & s_n[k+L+P-2+iB] & \cdots & s_n[k+P+iB] \end{bmatrix}, \quad X_i \in C^{P \times L} \quad (11)$$

式(8)中， ϵ 为与噪声有关的一个参量。上述MIMO信道联合稀疏恢复问题可用同步正交追踪匹配(SOMP)算法进行求解。

2.3 联合数据块分布式压缩感知 MIMO 水声信道估计算法

输入： I 个接收数据块 $Y_m = [y_m^1 \ y_m^2 \ \cdots \ y_m^I]^T$, $Y_m \in C^{PI \times 1}$ ；观测矩阵 $A_n \in C^{PI \times LI}$ ；最大迭代次数 K ；残差误差门限 thres 。

初始化：初始化残差 $(R^i)_0 = y_m^i, (R^i)_0 \in C^{P \times 1}$, $i \in (1, 2, \dots, I)$, $(\cdot)_i$ 表示第 i 次迭代，上标表示数据块索引。初始化原子索引集 $\Omega = \emptyset$ ；初始化原子集 $\text{Phit}^i = \emptyset$ ；第 i 个数据块对应的多径系数 $\hat{h}_{n,m}^i = \emptyset$ ，

描述为

$$h_i = \Psi_i \Omega + d_i, \quad i \in (1, 2, \dots, I) \quad (7)$$

式(7)中， I 表示数据块个数。对于相邻数据块间具有时间相关性的水声信道，其响应由大量具有共同稀疏支撑集 Ω 的多径成分和少量位置不同的差异成分 d_i 组成，其中各信道具有相同稀疏支撑集的多径成分其稀疏支撑集系数 Ψ_i 不同。则，基于分布式压缩感知的思想可对 JSM2 模型下的水声信道进行联合稀疏恢复估计，建立如式(8)优化问题：

$$\left. \begin{aligned} \hat{H}_{n,m} &= \arg \min \sum_{i=1}^I (\|h_{n,m}^i\|_1) \\ \text{s.t. } \|Y_m - A_n H_{n,m}\|_2^2 &\leq \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中， I 表示联合 I 个数据块进行联合稀疏重构， $h_{n,m}^i$ 表示第 m 个接收阵元接收来自第 n 个发射阵元信号中的第 i 个数据块的信道， $H_{n,m} = [h_{n,m}^1 \ h_{n,m}^2 \ \cdots \ h_{n,m}^I]^T$, $H_{n,m} \in C^{LI \times 1}$, $Y_m = [y_m^1 \ y_m^2 \ \cdots \ y_m^I]^T$, $Y_m \in C^{PI \times 1}$ ； y_m^i 表示第 m 个接收阵元接收到信号的第 i 个数据块， y_m^i 定义为

$$y_m^i = [y_m^i(k+L+iB), y_m^i(k+L-1+iB), \dots, y_m^i(k+L+P-1+iB)]^T, \quad y_m^i \in C^{P \times 1} \quad (9)$$

式中 B ($B \geq P$) 为数据块长度， $i \times B$ 表示数据块偏移量。构建观测矩阵 A_n ：

$$A_n = \begin{bmatrix} X_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & X_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & X_I \end{bmatrix}, \quad A_n \in C^{PI \times LI} \quad (10)$$

$i \in (1, 2, \dots, I)$ ；初始化迭代次数 $t=1$ 。

步骤 1 分别选取观测矩阵 A_n 中的原子 X_i 与残差 $(R^i)_{t-1}$ 作内积，并将求出 I 个数据块对应的内积和，计算内积和的最大位置 $(\lambda)_t$ ，保存 $(\lambda)_t$ 和保存最大位置所对应的原子，即 X_i 对应的 $(\lambda)_t$ 列表示为 $X_{i,(\lambda)_t}$ 。

$$\left. \begin{aligned} (\lambda)_t &= \arg \max \sum_{i=1}^I \langle X_i, (R^i)_{t-1} \rangle \\ \Omega &= \Omega \cup (\lambda)_t \\ \text{Phit}^i &= \text{Phit}^i \cup X_{i,(\lambda)_t} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

步骤 2 采用最小二乘法分别计算每个数据块

对应的多径系数

$$\beta_i = \left[\left(\mathbf{X}_{i,(\lambda)_i} \right)^H \mathbf{X}_{i,(\lambda)_i} \right]^{-1} \mathbf{X}_{i,(\lambda)_i} \mathbf{y}_m^i, i \in (1, 2, \dots, I) \quad (13)$$

保存各数据块的多径系数 $\hat{\mathbf{h}}_{n,m}^i = \hat{\mathbf{h}}_{n,m}^i \cup \beta_i, i \in (1, 2, \dots, I)$ ，并求残差

$$\left(\mathbf{R}^i \right)_t = \mathbf{y}_m^i - \text{Phit}^i * \hat{\mathbf{h}}_{n,m}^i \quad (14)$$

步骤 3 收敛判断：如果残差小于指定设置的残差门限 thres 或迭代次数大于设定次数则停止迭代；否则继续迭代： $t = t + 1$ 。

输出：各个通道的重构多径系数 $\hat{\mathbf{h}}_{n,m}^i, i \in (1, 2, \dots, I)$ 和稀疏位置集 Ω 。至此可恢复出第 n 个发射阵元到 m 个接收阵元的信道特性。

从上述迭代步骤中可以看出，时域联合稀疏恢复水声信道估计方法在利用每个数据块信道稀疏性的基础上，在同步匹配追踪算法迭代中对数据块间多径位置相同稀疏部分进行叠加(如式(12)所示)，以进一步找到多径的稀疏位置，提高信道多径重建概率，从而抑制其同道干扰。特别地，当 $I=1$ 时，上述方法退化成经典的 OMP 算法。

2.4 信道估计算法性能评估

在可获取准确信道特性的情况下，信道估计算法的性能可用信道估计的均方误差(Mean Square Error, MSE)表示，定义信道估计的均方误差 MSE 为

$$\text{MSE} = E \left[\left\| \mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}} \right\|_2^2 \right] \quad (15)$$

其中， \mathbf{h} 为准确已知信道， $\hat{\mathbf{h}}$ 为信道估计算法获得的信道估计结果。

考虑到在实际水声通信应用中无法准确获取海上实际信道响应用于信道估计算法的性能评估，本文在海试实验部分采用基于信道估计的时间反转接收机所获得的通信性能评价信道估计的性能^[7]。接收机采用文献[13]所示接收机，首先用文献[6]中的多普勒估计方法估计多普勒频移，然后采用重采样进行多普勒校正和补偿。分别对多普勒补偿完的每个通

道进行信道估计，利用每个通道的信道估计结果进行单通道时间反转处理，联合每个通道时间反转处理后的信号经过二阶锁相环^[15]跟踪和补偿相位，送入判决反馈均衡器进行消除残余多径和判决恢复信息码元。可通过该接收机获取的通信性能进行信道估计算法评估。

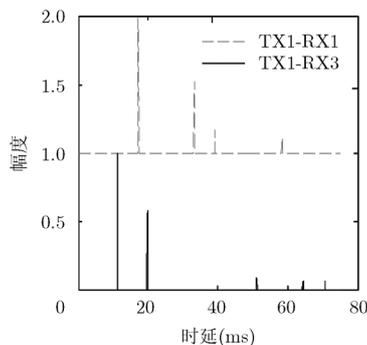
3 仿真实验

为了验证本文提出的联合稀疏恢复 MIMO 水声信道估计方案进行了仿真实验。仿真实验采用 Bellhop 水声信道模型。Bellhop 水声信道模型中设定水深 50 m，发射阵列和接收阵列的水平距离为 1000 m，设定声速恒定为 1500 m/s。两个发射阵元组成的发射阵列分别位于水下 15 m 和 35 m 处，分别记为 TX1 和 TX2；4 个接收阵元组成的垂直接收阵列分别位于水下 10 m, 20 m, 30 m 和 40 m 处，分别记为 RX1, RX2, RX3 和 RX4。仿真中实验中，假设声波经过海底海面反射时无能量损失，海底的反射系数为 1，海面的反射系数为 -1。记 TX_n-RX_m 为第 n 个发射阵元到第 m 个接收阵元的信道。

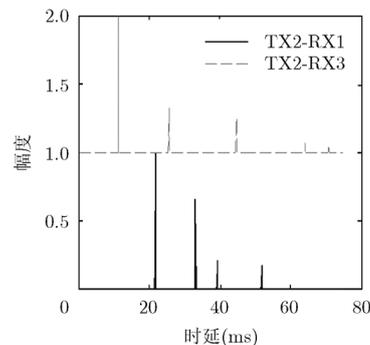
仿真实验中，系统采用 QPSK 调制解调，调制中心频率为 16000 Hz，符号速率为 4000 symbol/s，叠加高斯噪声为背景噪声。

图 1 为仿真实验的信道冲激响应图，其中图 1(a) 为 TX1-RX1 和 TX1-RX3 信道冲激响应，图 1(b) 为 TX2-RX1 和 TX2-RX3 信道冲激响应图。如图所示，仿真信道中有 4 条多径(TX1-RX1, TX2-RX3) 或 5 条多径(TX1-RX3, TX2-RX1)，多径时延分布在 30~60 ms 之间，属于典型的长时延水声信道。如果采用传统的 LS 或者 MMSE 信道估计方法，需要较长的训练序列长度，不但增加了系统的开销，而且增加了计算复杂度。传统的 OMP 信道估计方法由于存在长时延多径干扰和同道干扰，造成估计性能下降。

为了说明本文方案的性能，比较了连续两个数



(a) TX1-RX1和TX1-RX3信道冲激响应



(b) TX2-RX1和TX2-RX3信道冲激响应

图 1 仿真实验信道冲激响应图

据块联合稀疏估计(对应算法记为 Joint 2 blocks Distributed Compress Sensing, J2DCS)、连续 4 个数据块联合稀疏估计(记为 Joint 4 blocks Distributed Compress Sensing, J4DCS)、连续 8 数据块联合稀疏估计(记为 Joint 8 blocks Distributed Compress Sensing, J8DCS)与经典的 OMP 算法和 LS 算法的性能。系统的信噪比为 7 dB, 信道阶数为 600, OMP 算法、J2DCS 算法、J4DCS 算法和 J8DCS 算法设定多径数与仿真对应信道的多径数一致。采用 2.4 节所述的信道估计均方误差为参数来表征不同信道估计算法的信道估计性能。

图 2 为训练序列长度与信道估计误差曲线图, 其中图 2(a), 图 2(b)分别为 TX1-RX1 信道、TX2-RX1 信道估计误差曲线。从图中可以看出, LS 的信道估计误差最大, 其原因为 LS 为非稀疏信道估计, 在非零抽头存在大量的估计噪声; 同时 LS 信道估计算法是非压缩感知算法, 要求训练序列长度大于信道估计阶数, 从而避免方程的欠定解, 在训练长度小于信道阶数的情况下, 造成大量的信道估计噪声, 这种估计噪声将影响水声 MIMO 通信系统的性能。从图 2 中可以看出, 训练长度在 100~600 时, J8DCS 信道估计算法的信道估计误差最小, J4DCS 信道估计算法对应的次之, J2DCS 信道估计算法优于传统的 OMP 估计算法。联合数据块信道估计算法可利用不同数据块间多径结构存在的相关性提高信道估计性能, 如式(12)所示, 不同数据块在多径稀疏位置相同处进行增强, 不仅抑制了 MIMO 信道的同道干扰, 而且提高了弱径的检测能力。

图 2 表明, 本文采用联合稀疏恢复的 MIMO 水声信道估计可以有效抑制同道干扰, 提高信道估计性能, 表明了文本方案的有效性。同时, 在仿真采用的时不变信道条件下, 联合越多数据块进行信道恢复将更有效抑制同道干扰和取得更高的增益。

4 海试实验

4.1 实验设置

为了进一步说明本文提出联合稀疏恢复 MIMO 水声信道估计的性能, 进行了海试实验。海试实验在厦门五缘湾海域进行, 实验水域为近似圆形的半封闭水域, 水域边界为防波堤, 存在边界反射, 平均水深 10 m。图 3(a)为实验示意图, 如图所示, 由两个发射阵元组成的发射阵列 TX1 和 TX2 分别位于水下 3 m 和 4.5 m 处; 垂直接收阵列由 8 个阵元组成, 记为 RX1~RX8, RX1 距离水面 2 m, 8 个接收阵元间垂直间距为 1 m。发射阵列和接收阵列水平距离为 1000 m。记 TX_n-RX_m 为第 *n* 个发射阵元到第 *m* 个接收阵元的信道。

图 3(b)为实验海域的声速梯度。从图中可以看出实验水域声速梯度呈微弱正梯度分布。

海试实验 MIMO 系统采用正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 调制, 载波中心频率为 16000 Hz, 传输符号率 4000 symbol/s, 每个发射阵元采用不相关的随机码元序列, 未采用信道编码, MIMO 的通信速率为 16 kbps。实验中分别采用 J2DCS, J4DCS, J8DCS, OMP 和 LS 信道估计算法估计信道特性。设置信道估计器长度为 150, 1/2 波特间隔, 用于信道估计的训练序列长度 *P* 分别设置为 300, 450 和 750, 分别对应 150, 225 和 375 个符号。

考虑到在实际水声通信应用中无法准确获取海上实际信道响应用于信道估计算法的性能评估, 而传统的信道均衡算法在长时延信道或存在多普勒信道中往往无法收敛, 本文在海试实验部分采用 2.4 节所述的基于信道估计的时间反转接收机所获得的误码率和星座图来表征信道估计的性能。联合 8 通道进行多通道时间反转处理, 在时间上和空间上聚焦多径。时间反转接收机参数设置为: 时间反转处理器阶数 150; 判决反馈均衡器前馈滤波器阶数 48、

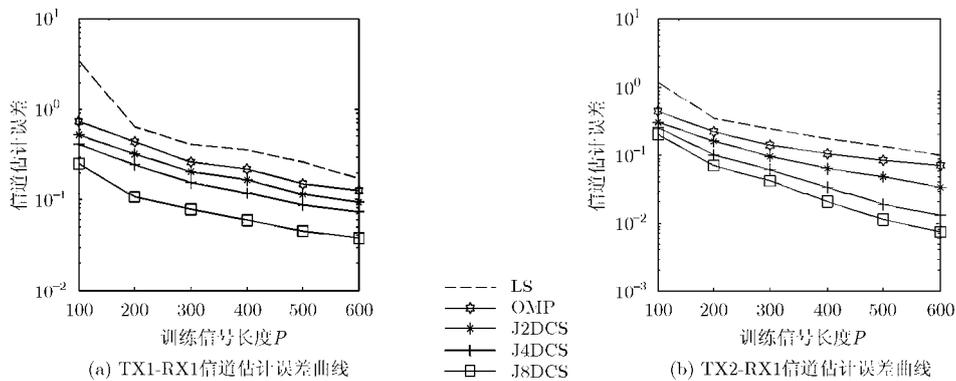
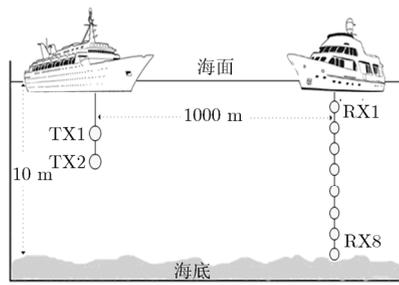
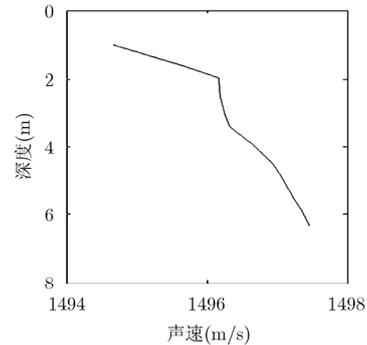


图 2 训练序列长度与信道估计误差曲线图



(a) 实验示意图



(b) 声速梯度

图 3 实验示意图和声速梯度

反馈滤波器阶数 24, 1/2 波特间隔。RLS 算法遗忘因子为 0.998 ;训练序列长度为 300 个符号。不同的信道估计算法采用完全相同的时间反转接收机参数以便于进行信道估计性能评估。

海试实验中 8 个通道接收信号的平均信噪比约为 13 dB,接收信号采样率为 96 kspss。用文献[6]方法测得多普勒频移为 -2.2 Hz。经过重采样进行多普勒初步校正并结合嵌入判决反馈均衡的二阶锁相位进行多普勒细校正^[15],二阶锁相环因子为 0.0003。

4.2 海试实验结果与分析

图 4 为在原始信噪比下,训练序列长度 P 为 450, TX2-RX6 信道的冲激响应图,其中图 4(a)~图 4(d)分别为 LS 信道估计算法、OMP 信道估计算法、J2DCS 信道估计算法和 J8DCS 信道估计算法对应的信道冲激响应图。从图中可以看出最长多径时延

为 6 ms,明显存在 4 条多径。

从图 4(a)中可以看出,由于未利用稀疏特性,LS 信道估计结果存在大量的估计噪声,将严重影响时间反转的性能。比较图 4(b)与图 4(c)和图 4(d),图 4(c)和图 4(d)的信道估计性能优于图 4(b)的信道估计性能,由于本文联合稀疏恢复算法利用数据块多径结构的相关性,在稀疏位置相同处提高了增益,抑制了 MIMO 的同道干扰,同时提高了弱径的检测性能;而 OMP 则没有,由于同道干扰,存在一定的估计噪声。比较图 4(c)和图 4(d),图 4(d)进一步抑制了估计噪声,并提高了弱径的检测能力,表明联合数据块越多将得到越高的增益,将更有利于抑制同道干扰。实验表明,本文所提出的联合稀疏恢复 MIMO 水声信道估计算法可以抑制同道干扰,提高弱径的检测能力,表明了本文方案的有效性。

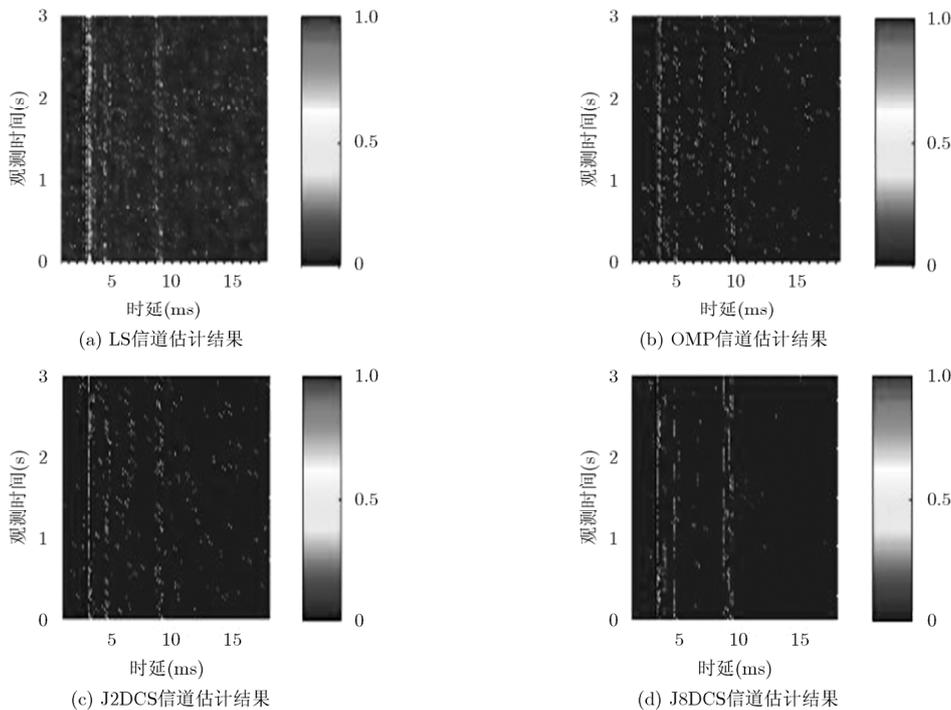


图 4 不同估计算法获得的 TX2-RX6 通道时变信道冲激响应

为了更进一步比较本文方案与经典 LS 信道估计及 OMP 信道估计方案的性能,采用 2.4 节所述的信道估计 MIMO 时间反转所获得的通信性能作为表征信道估计性能的指标。图 5 给出了原始信噪比下,训练序列长度与误码率曲线图。

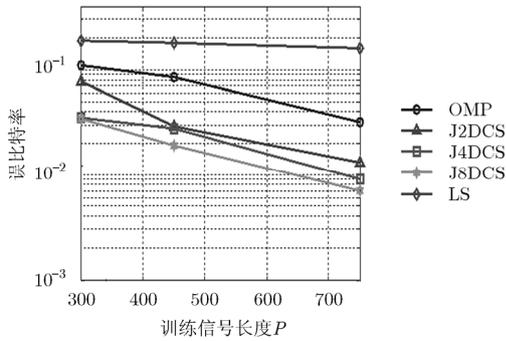


图 5 训练序列长度与 MIMO 通信误码率曲线图

从图 5 中可以看出,5 种信道估计算法所获得的误码率随着训练序列长度($P=300\sim 750$)的增长而降低,因为随着训练序列长度增长,接收信号与训练序列的相关性得到提高,增强了信道重构性能。从图 5 中还可以看出,LS 信道估计算法对应的误码率下降趋势最低,因为 MIMO 系统同道干扰造成 LS 信道估计性能下降,同时 LS 估计算法的估计噪声降低了时间反转的增益。采用 OMP 估计算法的接收机误码率比采用 LS 估计算法接收机误码率低,因为 OMP 信道估计算法属于稀疏信道估计算法,有效抑制了非零噪声,提高了时间反转接收机的增益,提高了通信系统的性能。

本文提出的时域联合稀疏恢复信道估计方案(J2DCS, J4DCS 和 J8DCS 信道估计算法)获得的误码率比 OMP 信道估计算法获得的误码率低,因为联合多个数据块间多径结构的相关性可以有效提高检测增益,抑制同道干扰,提高 MIMO 信道重建概率。从图 5 中还可以看出, J8DCS 信道估计算法所

获得的误码率最低。上述实验分析结果与仿真结果一致,表明了联合稀疏恢复 MIMO 水声信道估计可以提高信道估计性能,提高 MIMO 通信系统的性能,降低误码率,表明了本文方案的有效性。

图 6 为不同信道估计算法所获得的星座图,其中图 6(a)~图 6(c)对应为 LS 信道估计算法、OMP 信道估计算法和 J8DCS 信道估计算法所获得的星座图。从图中可以看出 LS 信道估计算法所获得的星座图最差,4 个象限出现混叠现象;采用 OMP 信道估计算法所获得的星座图比 LS 信道估计算法所获得的星座图区分度有所改善;而采用联合稀疏估计算法接收机的星座图区分度明显改善。不同信道估计算法所获得的星座图结果与仿真结果一致,进一步表明本文方案的有效性。

需要指出,由于海试信道时变的影响,联合稀疏恢复获得的性能改善并不随着利用数据块数的增加而持续提高,如图 5 中 J8DCS 方法获得的性能与 J4DCS 方法几乎一样。说明在时变信道下,数据块间的多径结构相关性减弱,利用本文提出的联合稀疏模型的多输入多输出水声信道压缩感知估计算法时所获得的性能增益相应降低。说明,在实际时变水声信道条件下,进行时域联合稀疏估计采用的数据块数并非越多越好。

为了更进一步说明时变信道对本文算法的影响,比较了不同间隔数据块组成的接收数据联合稀疏信道估计性能。比较试验中,采用两个数据块联合稀疏估计算法,训练序列长度为 300,均衡器参数采用 4.1 节所示参数,两个数据块间隔分别 0(即连续两个数据块)、2, 4, 6 和 8。比较性能采用 2.4 节所述的信道估计时间反转接收机获得的误码率表征。

图 7 为不同数据块间隔与误码率曲线图,从图中可以看出随着数据块间隔增大,信道估计所获得的误码率增加,间隔零个数据块(即连续两个数据块)联合稀疏估计所获得的误码率为 0.008,间隔 8 个

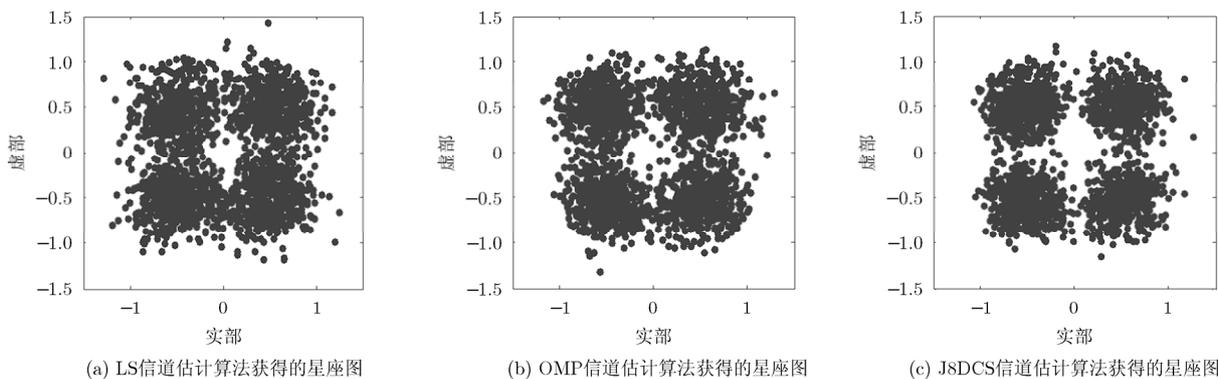


图 6 不同信道估计算法获得的星座图

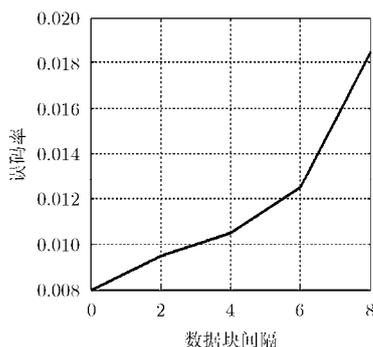


图 7 不同数据块间隔与误码率曲线

数据块联合稀疏信道估计所获得的误码率为 0.0185，从而可以说明时变越严重，数据块联合稀疏信道估计的性能下降。

5 总结

针对水声 MIMO 通信系统的同道干扰严重影响信道估计性能的问题，本文将水声 MIMO 数据分成若干个数据块，利用数据块间多径稀疏位置具有相关性，建立联合稀疏重构模型和利用同步正交匹配追踪算法优化模型。仿真实验和海试实验表明：本文所提出的联合稀疏恢复 MIMO 水声信道估计算法可以抑制同道干扰，提高弱径的检测能力，表明了本文所提方案的有效性。

参考文献

- [1] RAFATI A, LOU H, and XIAO C. Soft-decision feedback turbo equalization for LDPC-coded MIMO underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(1): 90-99. doi: 10.1109/JOE.2013.2241933.
- [2] LING J, TAN X, YARDIBI T, et al. On Bayesian channel estimation and FFT-based symbol detection in MIMO underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(1): 59-73. doi: 10.1109/JOE.2012.2234893.
- [3] YANG Z and ZHENG Y R. Robust adaptive channel estimation in MIMO underwater acoustic communications[C]. OCEANS 2014, Taipei, 2014: 1-6. doi: 10.1109/OCEANS-TAIP.2014.6964573.
- [4] YANG Z and ZHENG Y R. Iterative channel estimation and turbo equalization for multiple-input multiple-output underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 41(1): 232-242. doi: 10.1109/JOE.2015.2398731.
- [5] 王彪, 支志福, 戴跃伟. 移动水声通信多径传输非一致多普勒估计方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(3): 733-738. doi: 10.11999/JEIT140665.
WANG Biao, ZHI Zhifu, DAI Yuewei. Study on non-uniform doppler estimation for underwater acoustic mobile communications with multipath transmission[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 733-738. doi: 10.11999/JEIT140665.
- [6] SONG A, BADIEY M, MCDONAL V K, et al. Time reversal

- receivers for high data rate acoustic multiple-input-multiple-output communication[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(4): 525-538. doi: 10.1109/JOE.2011.2166660.
- [7] SONG A, ABDI A, BADIEY M, et al. Experimental demonstration of underwater acoustic communication by vector sensors[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(3): 454-461. doi: 10.1109/JOE.2011.2133050.
 - [8] BARON D, WAKIN M B, DUARTE M F, et al. Distributed compressed sensing[J]. *Preprint*, 2012, 22(10): 2729-2732.
 - [9] CHENG P, CHEN Z, RUI Y, et al. Channel estimation for OFDM systems over doubly selective channels: A distributed compressive sensing based approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(10): 4173-4185. doi: 10.1109/TCOMM.2013.072813.120758.
 - [10] 胡海峰, 杨震. 无线传感器网络中基于空间相关性的分布式压缩感知[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2009, 29(6): 12-16.
HU Haifeng and YANG Zhen. Spatial correlation-based distributed compressed sensing in wireless sensor networks[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2009, 29(6): 12-16.
 - [11] CORROY S and MATHAR R. Distributed compressed sensing for the MIMO MAC with correlated sources[C]. 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, 2012: 2516-2520. doi: 10.1109/ICC.2012.6363969.
 - [12] Wang D H, Kai N I U, He Z Q, et al. Channel estimation based on distributed compressed sensing in amplify-and-forward relay networks[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2010, 17(5): 44-49. doi: 10.1016/S1005-8885(09)60506-9.
 - [13] 周跃海, 伍飞云, 童峰. 水声多输入多输出信道的分布式压缩感知估计[J]. *声学学报*, 2015, 40(4): 519-528. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.12.015.
ZHOU Yuehai, WU Feiyun, and TONG Feng. Distributed compressed sensing estimation of underwater acoustic multiple-input-multiple-output channels[J]. *Acta Acustica*, 40(4): 519-528. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.12.015.
 - [14] 叶新荣, 朱卫平, 张爱清, 等. OFDM 系统双选择性慢衰落信道的压缩感知估计[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(1): 169-174. doi: 10.11999/JEIT140247.
YE Xinrong, ZHU Weiping, ZHANG Aiqing, et al. Compressed sensing based on doubly-selective slow-fading channel estimation in OFDM systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 169-174. doi: 10.11999/JEIT140247.
 - [15] 童峰, 许肖梅, 方世良, 等. 改进支持向量机和常数模算法水声信道盲均衡[J]. *声学学报*, 2012, 37(2): 143-150.
TONG Feng, XU Xiaomei, FANG Shiliang, et al. Blind equalization of underwater acoustic channels based on modified support vector machine and constant modulus algorithm[J]. *Acta Acustica*, 2012, 37(2): 143-150.

周跃海：男，1987年生，博士生，研究方向为水声信号处理。

吴燕芝：女，1990年生，硕士生，研究方向为水声信号处理。

陈东升：男，1975年生，助理教授，研究方向为水声信号处理。

童峰：男，1973年生，教授，博士生导师，研究方向为水声信号处理。