基于排序码本的水声自适应OFDM通信中信道状态信息反馈研究

刘松佐①②③④ 韩 雪①②③ 马 璐*①②③④ 徐金颉①②③ 杨 洋①②③
①(哈尔滨工程大学水声技术全国重点实验室 哈尔滨 150001)
②(工业和信息化部海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 哈尔滨 150001)
③(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)
④(哈尔滨工程大学三亚南海创新发展基地 三亚 572024)

摘 要：水声(UWA)信道时延扩展大等特点导致信道频响(CFR)快衰落，水声通信(UWAC)技术发展受到挑战。发射端获取有效可靠的信道状态信息(CSI)是自适应通信的前提，针对水声自适应正交频分复用(OFDM)通信的需求，该文提出基于排序码本的信道状态信息分组排序拟合反馈算法(CSI-GSFF)，包括分组、排序、数据拟合3个步骤。该算法首先将相邻导频子载波分组，以组为反馈单元；然后对各组内的导频子载波按照信道增益值进行排序，以减轻水声信道频响快衰落造成的反馈开销大等不利影响；最后进行多项式拟合，排序操作有效地降低了拟合阶数。通过实测海试时变信道数据仿真，结果表明，该文提出的信道状态信息反馈算法能够基本达到完美信道状态信息情形下的水声自适应OFDM通信系统误码率性能，同时可以有效地减少反馈开销。

关键词：水声通信；正交频分复用；自适应调制；信道状态信息；有限反馈

中图分类号：TN929.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2024)05-2095-09

DOI: 10.11999/JEIT230878

Research on Channel State Information Feedback in Underwater Acoustic Adaptive OFDM Communication Based on Sequenced Codebook

LIU Songzuo①②③④ HAN Xue①②③ MA Lu①②③④ XU Jinjie①②③
YANG Yang①②③
①(*National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *China*)
②(*Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security*(*Harbin Engineering University*), *Ministry of Industry and Information Technology*, *Harbin* 150001, *China*)
③(*College of Underwater Acoustic Engineering*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *China*)
④(*Sanya Nanhai Innovation and Development Base of Harbin Engineering University*, *Sanya* 572024, *China*)

Abstract: As a result of the characteristics of UnderWater Acoustic (UWA) channel, such as rapid fading of Channel Frequency Response (CFR) due to large delay spreading, the development of UnderWater Acoustic Communication (UWAC) technology is challenged. The acquisition of effective and reliable Channel State Information (CSI) at the transmitter is a prerequisite for adaptive communication. To meet the needs of UWA adaptive OFDM communication, a CSI-Grouping-Sequencing-Fitting-Feedback (CSI-GSFF) based on sequenced codebook algorithm is proposed, which consists of three steps, including grouping, sequencing, and data fitting. Firstly, adjacent pilot subcarriers are divided into several groups and each group is seen as a

收稿日期：2023-08-10；改回日期：2024-03-14；网络出版：2024-04-10
*通信作者： 马璐 malu@hrbeu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金(6227116)，国家重点研发计划(2021YFC***1101)，山东省重点研发计划(2022CXGC020409)，水声技术全国重点实验室基金(2023-JCJQ-LB-072-08)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62271161), The National Key R&D Plan (2021YFC***1101), The Key Research and Development Program of Shandong Province (2022CXGC020409), The National Key Laboratory Foundation of Underwater Acoustic Technology (2023-JCJQ-LB-072-08)

feedback cell. Then, the pilot subcarriers within each group are sorted according to the channel gains to mitigate adverse effects such as high feedback overhead caused by the rapid fading of CFR. Finally, polynomial fitting is performed, and the sorting operation effectively reduces the fitting order. Through the simulation of time-varying channel data in sea trials, the results show that the CSI-GSFF algorithm can achieve the Bit Error Rate (BER) performance of the UWA adaptive OFDM communication system under the perfect CSI, while effectively reduce the feedback overhead.

Key words: UnderWater Acoustic Communication (UWAC); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Adaptive modulation; Channel State Information (CSI); Limited feedback

1 引言

21世纪以来，海洋经济、开发、攻防等领域的创新技术越来越受到各个海洋大国的重视。其中，水下信息交互技术更是各国研究人员重点关注的课题之一。以声波为载体的水声通信技术是水下最有效也最具发展前景的通信方式。然而，水声信道具有带宽受限、大传播时延、频率选择性衰落、随机变化等复杂特性[1]，一个可靠完善的水声通信系统应该具备环境感知能力，该通信系统可以根据当前的水下环境条件做出判断，从而实时动态地调整通信参数，提高通信可靠性。因此，水声领域相关研究人员将自适应通信技术与正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术相结合，构建水声自适应OFDM通信系统，提高水声通信数据传输速率和可靠性。

在水声自适应通信中，发射端需要获取信道状态信息(Channel State Information, CSI)进行发射参数优化。由于水声信道的收发非对称性，发射端需要通过接收端的反馈获得信道状态信息[2]。然而，由于水声信道的复杂特性，导致水声领域的自适应通信研究一直滞后于陆地无线电通信。目前，针对于实时的水声自适应OFDM通信系统的研究较少。2014年，文献[3]提出误码率(Bit Error Rate, BER)一定条件下系统吞吐量最大化的水声自适应OFDM系统，该系统能够根据信道状态信息自适应地调整OFDM子载波的调制方式和功率，并进行了相关的海试实验。但是，值得注意的是该通信系统是利用无线电领域的射频电路实现CSI的反馈，并没有通过水声信道链路反馈CSI。文献[4,5]首先针对信道评估准则进行了研究，提出了一种新的信道状态信息衡量准则——有效信噪比(Effective Signal-to-Noise Rate, ESNR)，并将其作为CSI度量指标，设计了能够切换不同工作模式(编码码率和调制方式)的水声自适应OFDM通信系统，并于台湾高雄海域进行了实时测试，验证该系统可以在给定的传输功率下最大化传输速率。然而，计算ESNR需要在信道估计之后并且接收端对数据符号成功解码，但是实际情况不总是符合条件，解码过程也存在一定的计算复杂度。以上研究是目前为止为数不多已构建出完整的水声自适应OFDM通信系统，并进行了实时海试信道性能验证的文章，对水声自适应通信系统的后续研究具有指导意义并能够体现出实用价值，水声自适应通信系统的研究仍具有极大潜在的创新空间。

然而，目前水声自适应通信系统的相关研究大多数将重点放在自适应调制算法的优化[6–9]、信道估计[10,11]及信道预测[3,12–14]上。信道估计技术的创新可以进一步降低估计误差以及运算复杂度、信道预测可以大大地降低信道时变性带来的不利影响，自适应调制算法优化可以降低通信系统的误码率和运算复杂度。水声自适应通信领域的研究多数是基于完美CSI进行自适应调制算法的创新。其中，完美CSI是通信系统接收端信道估计之后没有考虑信道时变性以及CSI量化反馈误差等因素的CSI，在发射端基于完美CSI进行自适应调制是一种理想状态下的通信系统，目前缺少对于CSI具体反馈形式以及反馈算法的相关研究。文献[3,15]设计了两种类型的反馈信息：(1) 将子载波分簇，反馈各子载波簇的调制方式和量化功率的量化电平；(2)反馈稀疏信道冲击响应的量化估计，并应用游程编码技术进一步降低反馈量。仿真结果表明在一定误码率(BER)条件下，第2种方案反馈所需的比特数远远少于第1种方案。如果使用分簇算法，两种方案策略所需的反馈比特数接近，但分簇算法是以牺牲方案2的吞吐量为代价的。文献[16,17]将相邻的子载波分组成簇，对每簇的ESNR进行量化。在不考虑频带边缘的空子载波和导频子载波情况下，将子载波分簇，并将每个用户的ESNR范围均匀量化。虽然大大降低了反馈开销，但是ESNR的使用有一定局限性，它需要在信道估计和成功数据解码之后才能计算。而且OFDM通信系统是根据导频子载波位置处的信道频响值估计得出全部子载波位置的信道频响值。因此，本文对相邻的导频子载波进行分组可以减少待反馈的信息，进一步减少反馈开销。文献[18]研究水声多输入多输出OFDM(Multiple Input Multiple Output-OFDM, MIMO-OFDM)通信

系统，当反馈信息量增加时，相较于基于码本的反馈方法，基于压缩感知的反馈方法呈现出明显优势，并针对SL0算法进行改进，减小重构恢复误差，保证了发射端获取信道信息的准确性，显著提高水声通信系统的性能。文献[14]利用多项式拟合将CSI用多项式表示，接收端只需要反馈有限个系数，并在发射端完成多项式拟合重建，大大降低了反馈开销。通过海试数据仿真发现，基于数据拟合的CSI重构方法具有更低的误码率和更小的反馈开销。此种方法针对不同的水声频率选择性衰落信道，阶数取值为10～20时具有良好的拟合效果，而拟合阶数的增加会提高反馈量。

在陆地无线移动通信中，CSI反馈算法研究同样也是核心问题之一。当发射端获悉CSI，就能够使用预编码技术提升MIMO通信系统的性能。文献[19]提出基于码本的有限反馈算法，这种方法在减少反馈开销的同时，提高了系统的吞吐量。文献[20]将压缩感知方法用于压缩大规模MIMO空间相关信道，结合差分反馈和降维的概念，可以有效地减少反馈量。近年来深度学习技术迅速发展，文献[21]基于深度神经网络设计信道压缩反馈算法，与传统的有限反馈算法相比，该文献提出的方法显示出1 dB符号错误率增益，计算复杂度降低。然而，水声信道时延扩展大、带宽有限等特性导致水声信道频率选择性衰落严重，无线通信中的CSI反馈算法并不完全适用于水声通信中。

本文聚焦于水声自适应OFDM通信系统中信道状态信息有限反馈算法研究，涉及的贡献如下：

(1) 提出一种基于排序码本的信道状态信息分组排序拟合反馈算法(简称为分组排序拟合反馈算法)，共包含导频子载波分组、基于排序码本按照信道增益值排序以及多项式拟合3个步骤。其中，基于排序码本排序是对导频子载波位置处的信道增益值排序，大大地降低后续数据拟合时的多项式阶数，从而减少反馈开销，以减轻水声信道频响快衰落造成的反馈开销大等不利影响。

(2) 在归一化均方误差、信道增益曲线拟合以及反馈量3个方面，对比了本文提出的分组排序拟合反馈算法、多项式拟合反馈算法以及压缩感知反馈算法等3种CSI反馈算法的仿真结果。结果表明，本文所提出的CSI反馈算法比多项式拟合反馈算法的信道增益曲线拟合效果更准确，同时归一化均方误差更低；而相比于压缩感知反馈算法，在信道增益曲线的极值处拟合效果更好且归一化均方误差和反馈量也更小。

(3) 通过两种实测海试信道数据(具有不同的时延扩展)进行基于CSI有限反馈的水声自适应OFDM通信系统的误码率性能仿真。结果表明，采用本文提出的反馈算法的自适应通信系统即使在信道条件较差时仍能够基本达到完美CSI自适应通信系统误码率性能，并可以有效地减少反馈开销。

本文第2节介绍水声自适应OFDM系统模型，第3节描述了分组排序拟合反馈算法，第4节基于实测海试时变信道数据进行仿真，在归一化均方误差、反馈量以及水声自适应通信系统误码率等3种度量指标条件下对比了其他2种传统的反馈算法，并进行性能分析。第5节是结论部分。

2　系统模型

为了克服多径引起的符号间干扰和子载波干扰，通常在发送信号前端添加循环前缀(Cyclic Prefix, CP)，且使CP持续时间长度大于信道最大多径时延。以下建立水声CP-OFDM通信系统的基本模型，一些参数符号的说明：子载波总数为N，其中梳状导频子载波总数为$N_{\rm p}$，带宽为B，OFDM符号持续时间$T=N/B$，CP持续时间为$T_{\rm cp}$，中心频率为$f_{\rm c}$，第k个子载波上传输的符号为$s[k]$。如图1所示，其中MODULATOR N/ DEMODULATOR N中所代表的调制方式为二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)、正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、八相相移键控 (8 Quadrature Phase Shift Keying, 8PSK)以及正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)。经过上变频之后，第k个子载波的频率为

$$f_k=f_{\rm c}+\frac{k}{T},k=-\frac{N}{2},-\frac{N}{2}+1,\cdots,\frac{N}{2}-1 \tag{1}$$

时域发射信号为

$$\tilde{x}(t)=2{\rm Re}\left\{\sum_{k=-N/2}^{N/2-1}s[k]{\rm e}^{{\rm j}2\pi f_k t}q(t)\right\},t\in[-T_{\rm cp},T] \tag{2}$$

其中，$q(t)$为矩形窗，表达式为

$$q(t)=\begin{cases}1, & t\in[-T_{\rm cp},T]\\ 0, & 其它\end{cases} \tag{3}$$

假设信道包含L条有效路径，那么

$$h(t)=\sum_{l=1}^{L}\beta_l\delta[(1+\alpha)t-\tau_l] \tag{4}$$

其中，$h(t)$为信道冲激响应，β_l和τ_l分别表示路径增益和路径时延。为简化计算，假定接收端已进行必要的预处理步骤，包括多普勒估计与补偿、快速傅里叶变换[22]以及信道预测[14]，从而获得频域接收

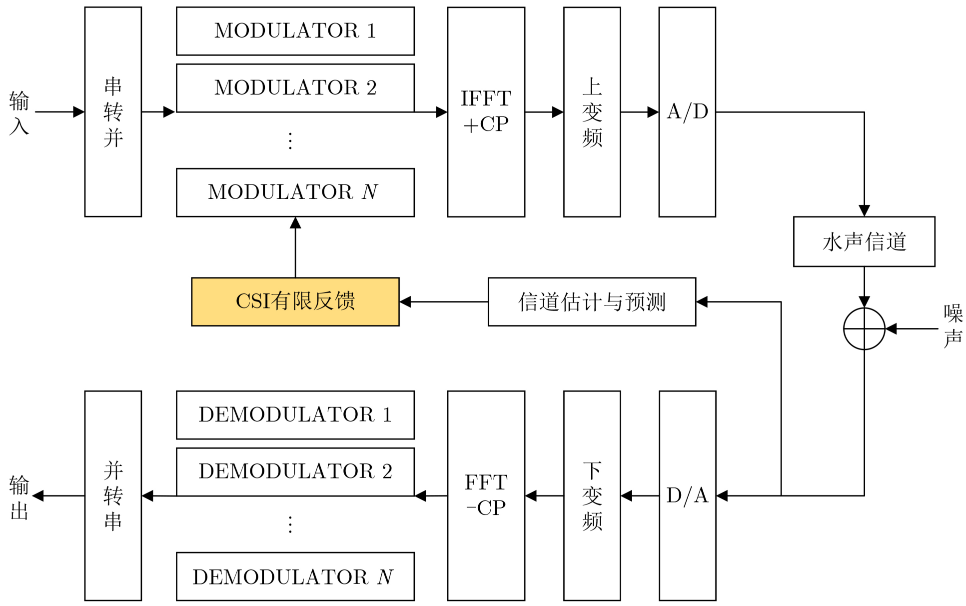


图 1 基于有限反馈的水声自适应OFDM通信系统原理框图

信号。根据导频子载波上的频域测量值利用基于插值的正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)进行信道估计[11]。$z[k]$表示频域接收信号，$\hat{H}[k]$表示估计得到的信道频响。信道输入输出关系为

$$z[k]=\hat{H}[k]s[k]+\eta[k] \tag{5}$$

其中，$\eta[k]$包含环境噪声、残余的子载波间干扰以及信道估计误差[4]。

3 分组排序拟合反馈算法

本文从自适应调制算法所需的CSI特点进行研究，目前传统的自适应调制算法Hughes-Hartogs算法、Chow算法、Fisher算法以及它们相应的改进算法都是基于信道频响的绝对值(即信道频响增益值$\left|\hat{H}[k]\right|$)进行算法设计。因此在CSI有限反馈算法的设计过程中，针对信道增益值开展有限反馈算法研究。同时，由于信道频响是复数值(实部和虚部两部分构成)，而信道增益是实数值，因此采用信道增益值作为反馈信息天然地降低了一部分的反馈开销。

该文提出基于排序码本的信道状态信息分组排序拟合反馈算法(简称为分组排序拟合反馈算法)，在接收端包括分组、排序、多项式拟合3个步骤，在发射端包括初步重建、重新排序等2个步骤。具体算法设计如下：

在基于梳状导频的水声自适应OFDM通信系统中，接收端的信道估计是根据导频子载波位置处的信道频响值估计全部子载波位置处的信道频响值。在CSI有限反馈算法设计中，也是将导频子载波位置处的信道频响值作为研究对象。首先将所有相邻的导频子载波平均分成G组，以组为反馈单元，那么每个组内的导频子载波数为

$$N_{\mathrm{sub}}=\frac{N_{\mathrm{p}}}{G} \tag{6}$$

分组步骤可以丰富CSI反馈信息从而提高发射端信道信息的重构精度，同时相对于反馈全部子载波位置处的信道信息而言，分组步骤也可以降低一部分反馈开销。所得到的每组导频信道增益值为

$$\left|\hat{H}_{\mathrm{p},m}\right|, m=1,2,\cdots,G \tag{7}$$

文献[14]直接对得到的CSI进行多项式拟合，此时由于水声信道时延扩展大所引起的频域快衰落(如图2中(a)图所示)，常常需要10～20阶的多项式才能完成CSI数据拟合，而阶数越高，反馈开销越大。本文设计一个接收端和发射端都已知的排序码本，码本内容如图3排序步骤中的码本所示，其记录了每个组内导频子载波索引所有排序的可能(码本维度大小为$N_{\mathrm{sub}}!$)。设计排序码本的目的是对分组后每个组内的信道频响增益值按照从小到大进行排序，将水声信道频响的快衰落变换成慢衰落(如图2中(b)图所示)，这样在后续CSI数据拟合时可以采用更低阶数的多项式。那么，组内导频子载波经过排序后，组内导频子载波索引值对照排序码本就产生了码本序号(i)。反馈时需要将码本序号(i)作为反馈信息，以指导发射端CSI重建过程中组内子载波索引的重新排序。

经过排序后的每组导频位置处信道频响增益值表示为

$$\gamma_m = \mathrm{sort}\left(\left|\hat{H}_{\mathrm{p},m}\right|\right) \tag{8}$$

其中，sort(·)表示按照信道频响增益值进行升序排序。对排序后的每个组内的CSI信息进行数据拟合。数据拟合的具体实现方法为对于已知变量x及其函数值y，其特征可用某种形式的函数[14]近似表示为

$$y = f(x, a, b, c) \tag{9}$$

其中，$a_1, a_2, \cdots, a_n$为待定常数。点对(x_i, y_i)的$n-1$次的多项式拟合公式为

$$y = ax^2 + bx + c \tag{10}$$

其中，c是随机误差，服从正态分布。

因此本文将γ_m作为函数值y，进行数据拟合，得到关于已知变量x的多项式为

$$\gamma_m = a_m x^2 + b_m x + c_m \tag{11}$$

反馈时需要将多项式系数a_m，b_m，c_m作为反馈信息。

发射端接收到反馈信息后，首先根据多项式系数a_m，b_m，c_m确定组数G，并通过多项式系数拟合恢复每组的信道频响增益值γ_m，此时恢复的信道频响增益值是如图2(b)图所示的排序后的信道频响增益信息。然后，各组根据码本序号(i)对照排序码本读取排序后的导频子载波索引值从而还原组内正常排序的导频子载波信道频响增益值$\left|\hat{H}_{\mathrm{p},m}\right|$，此时恢复的信息是如图2(a)图所示的排序前的信道频响增益信息。最后，根据所有组的反馈信息获得导频子载波位置处的信道频响增益值$\left|\hat{H}_{\mathrm{p}}\right|$，继续采用如线性插值等插值算法恢复得到全部子载波位置处的信道频响增益值$\left|\hat{H}\right|$。CSI反馈重建的过程为如图3所示的逆过程。

本文所提出的多项式拟合排序反馈算法的反馈量(单位：bit)计算为

$$G \cdot (Q + \log_2(N_{\mathrm{sub}}!)) \tag{12}$$

其中，Q表示反馈多项式系数所需的比特数，$\log_2(N_{\mathrm{sub}}!)$为排序码本序号所用的比特数。分组排序拟合反馈算法示意图如图3所示。

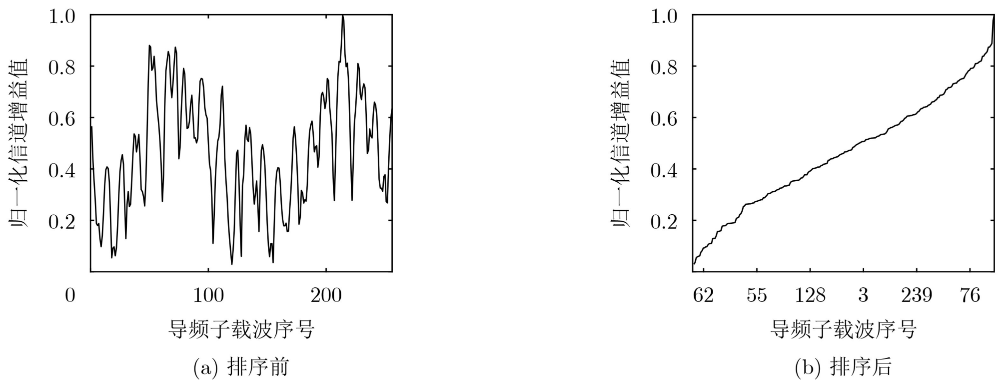


图 2 排序前后导频位置处信道增益曲线对比图

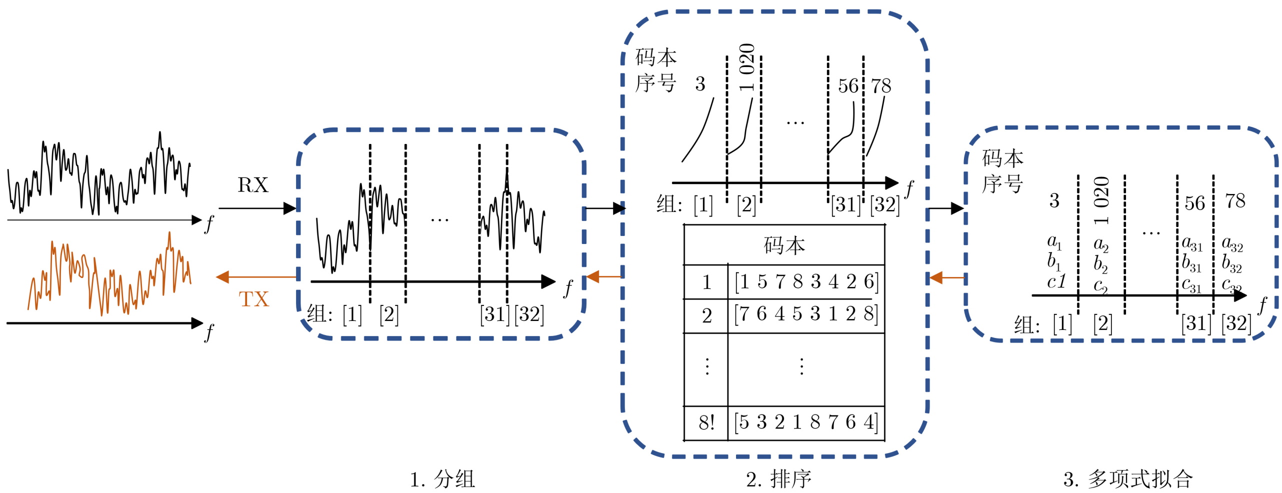


图 3 分组排序拟合反馈算法示意图(以32组为例)

4 海试信道仿真验证与结果分析

4.1 仿真条件及仿真参数设置

仿真所用信道数据为2014年5月在南海陵水海域收集的海试数据，试验海域平均水深为70 m，海况良好，海面偶有小幅涌。试验采用两只船分别下挂通信装置进行通信性能验证。其中一只船抛锚作为目标节点接收测试信号，在30 m的深度部署了一个三单元线阵(由水听器组成)和一个收发合置换能器共5个信号接收单元共同接收数据，4个接收单元之间的间距为0.6 m。一艘船是发射船，在27 m的深度部署了一个换能器。发射船移动到不同距离下分别进行锚点通信，发射端和接收端之间的通信距离为3 km。通信时由于风浪等因素，两船存在轻微的相对漂移现象。试验设置图如图4所示。

所用实测时变水声信道的时域冲击响应图(多普勒估计与完美补偿后)如图5所示，可以看出实测水声时变信道由多根离散分布的主要路径组成，幅度和时延随时间随机变化。信道A的最大时延约为11 ms，信道B的最大时延约为17 ms。在实测时变信道的信道状态信息有限反馈的仿真过程中，考虑了反馈时延(程序运算的时间以及OFDM符号周期时长忽略不计)，发射端发射信号至接收端，接收端反馈信道状态信息至发射端，信号经历双程的通信距离为6 km，反馈时延计算可得为4 s(水中声速约为1 500 m/s)。

本文考虑到信道时变性对信道状态信息有限反馈的影响，后续仿真时进行了信道预测，因此在CSI反馈过程中可认为信道缓慢时变。

本文采用的仿真参数设置如表1。

接收端信道估计方式采用基于插值的OMP信道估计算法，发射端自适应调制算法采用Hughes-Hartogs算法[13]，并且本文选用完美CSI情形下水声自适应OFDM通信系统性能作为对照标准，完美CSI没有反馈重构误差。

4.2 仿真结果分析

由于分组排序拟合反馈算法中，需要设计排序码本，其中排序码本记录了每个组内导频子载波索引所有排序的可能(码本维度大小为$N_{\mathrm{sub}}!$)。考虑到本文采用的仿真参数中，导频子载波数目为256个，在划分组数时，需要保证各组内的导频子载波数为整数，同时要考虑到码本维度大小。因此，在基于MATLAB平台的仿真过程中，由于计算机算力限制(若分为16组，码本维度为16！运算量过大)，本文所提出的分组排序拟合反馈算法采用分组数为32，那么码本维度为8!，后续进行仿真对比。

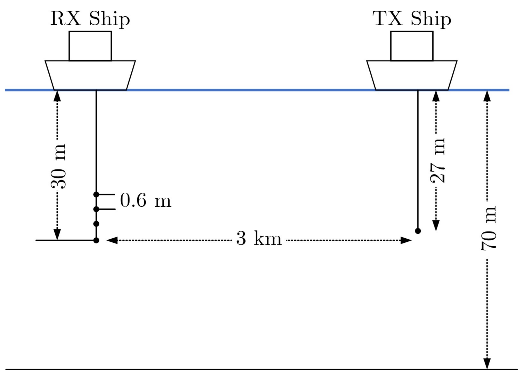
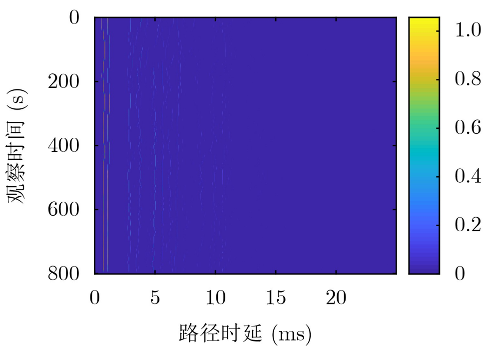


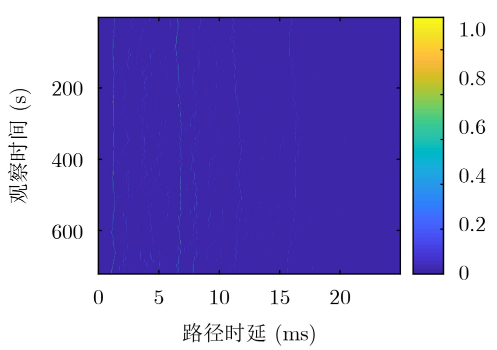
图 4 试验设置图

表 1 仿真参数设置表

参数名称	参数值
调制方式	BPSK/QPSK/8PSK/16QAM
采样频率(kHz)	48
中心频率(kHz)	9
信号带宽(kHz)	6
总子载波数目	1 024
数据子载波数目	704
导频子载波数目	256
OFDM符号周期(ms)	171
循环前缀(ms)	50



(a) 信道A

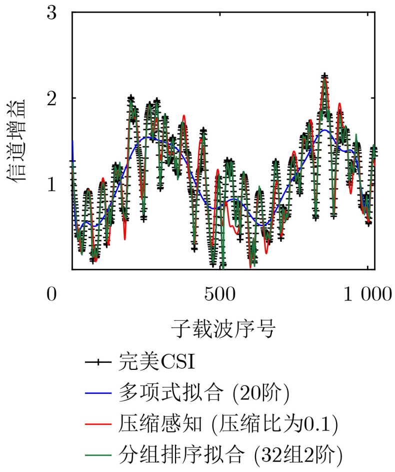


(a) 信道B

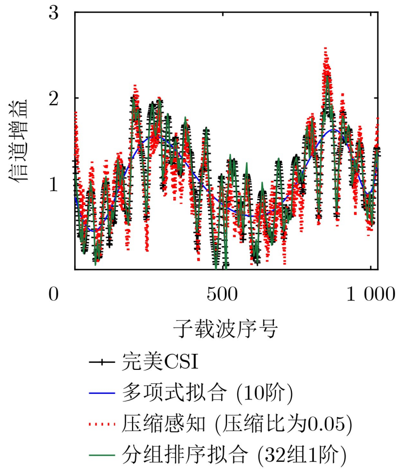
图 5 实测时变信道冲击响应图

4.2.1 信道增益拟合曲线对比以及归一化均方误差对比

如图6(a)和(b)所示，是信噪比(Signal-to-Noise Rate, SNR)为24 dB条件下，信道增益拟合曲线的结果。本文所提出的分组排序拟合反馈算法能够基本重建出完美CSI，而多项式拟合反馈算法只是恢复出信道频响增益值的变化趋势，不足够精确；基于压缩感知的反馈算法能够较好地重建出完美CSI，其重建效果和压缩比有关，在压缩比较低时(0.05)，信道重建时在信道增益曲线极值位置处拟合效果较差，产生了许多信道增益值本没有的尖刺部分。从表2的归一化均方误差结果可知，对于信道增益拟合效果较好的反馈算法，其归一化均方误差结果也小。



(a) 第1组



(b) 第2组

图 6 不同反馈算法间信道增益拟合曲线对比图

表 2　不同反馈算法间归一化均方误差对比

反馈算法	归一化均方误差($\times 10^{-5}$)
多项式拟合(20阶)	21.4
多项式拟合(10阶)	23.9
压缩感知(压缩比为0.1)	8.2
压缩感知(压缩比为0.05)	26.8
分组排序拟合(32组2阶)	1.1
分组排序拟合(32组1阶)	2.5

4.2.2 实测海试信道下有限反馈自适应通信SNR-BER结果图

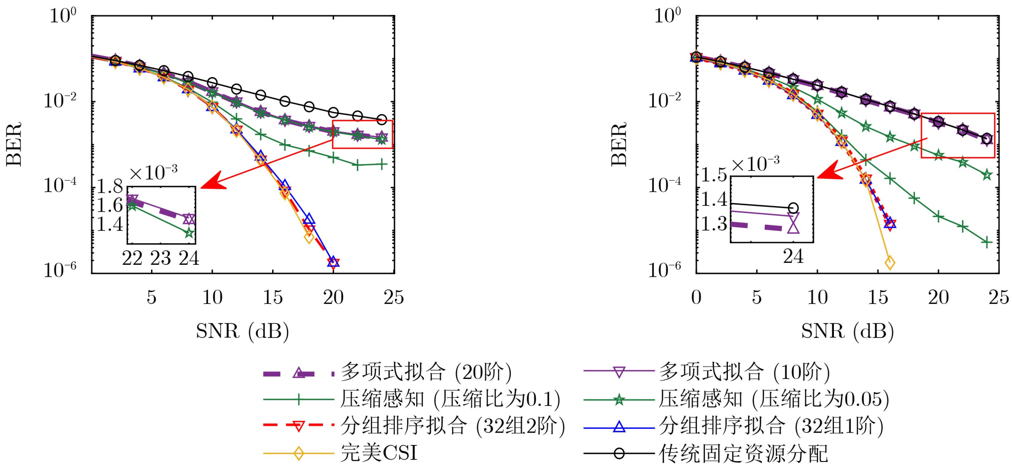
图7进行了两种实测海试时变信道下自适应通信系统SNR-BER的仿真结果对比。结果表明，在图7(a)图中，即信道A条件下(时延扩展较小，信道条件较好)时，分组排序拟合反馈算法能够基本达到完美CSI情形下通信系统的误码率性能，且误码率性能明显优于其他两种反馈算法；在信噪比为18 dB之后，其他两种反馈算法的误码率性能相较于完美CSI以及分组排序拟合反馈情形下的通信系统误码率性能差2个量级左右。在图7(b)图中，即信道B条件下(时延扩展较大，信道条件较差)时，采用多项式拟合反馈算法的自适应通信系统相较于传统固定资源分配下的通信系统已没有明显的误码率性能增益，而分组排序拟合反馈算法仍能够达到和完美CSI极为相近的自适应通信系统误码率性能；在信噪比为16 dB时，基于压缩感知的反馈算法相较于分组排序拟合反馈算法的通信系统误码率性能相差1个量级左右。

综上分析，在基于CSI有限反馈的水声自适应OFDM通信系统中，本文所提出的分组排序拟合反馈算法可以基本达到完美CSI情形下的水声自适应OFDM通信系统误码率性能。

4.2.3 不同反馈算法间反馈量对比

不同反馈算法间的反馈量对比如表3(单位是字节Byte)。本文所提出的分组排序拟合反馈算法反馈信息为码本序号和每组的多项式系数，(以32组为例)码本序号需要$16(\log_2(8!))$ (bit)，而多项式系数需要用short型表示，本文所提出的反馈算法的反馈量与分组数、多项式拟合阶数以及码本维度有关。基于压缩感知的反馈算法的反馈量与压缩比有关，且其反馈的是信道频响复数值，所以需要反馈实部和虚部两部分信息。

从表3结果可知，多项式拟合反馈算法所需的反馈量最少，但是综合自适应通信系统的SNR-BER性能而言，虽然它极大地降低了反馈量，但是实测时变海试信道下的误码率性能相较于其他两种算法而言没有明显优势。



(a) 信道A条件下 (b) 信道B条件下

图 7 Hughes-Hartogs算法下不同反馈算法自适应通信系统SNR-BER图

表 3 反馈量对比

反馈算法	反馈量(Byte)
多项式拟合(20阶)	42
多项式拟合(10阶)	22
压缩感知(压缩比为0.1)	408
压缩感知(压缩比为0.05)	204
分组排序拟合(32组2阶)	256
分组排序拟合(32组1阶)	19

综合而言，本文所提出的分组排序拟合反馈算法在能够基本达到完美CSI自适应通信系统SNR-BER性能的前提下，有效降低反馈开销。

5 结束语

本文提出了水声自适应OFDM通信中基于排序码本的信道状态信息分组排序拟合反馈算法，通过对导频子载波位置处的信道增益值进行分组排序，有效降低后续的多项式拟合阶数，减轻水声信道频响快衰落造成的反馈开销大等不利影响。基于排序码本的反馈方式，接收端向发射端反馈多项式系数以及码本序号等信息，有效地降低了反馈量。通过两种实测海试时变信道数据(具有不同时延扩展)仿真，结果表明相较于其他两种传统反馈算法，分组排序拟合反馈算法在归一化均方误差结果以及信道增益曲线拟合效果方面都具有明显优势。而且，在基于CSI有限反馈的水声自适应OFDM通信系统中，本文所提出的分组排序拟合反馈算法可以基本达到完美CSI情形下通信系统的误码率性能，同时可以有效地降低反馈量。

参 考 文 献

[1] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011: 11–35.
HUI Junying and SHENG Xueli. Marine Navigation Systems[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011: 11–35.

[2] 张育芝, 张效民, 王安义, 等. 水声通信网络信道建模与仿真研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1249–1261. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.04.002.
ZHANG Yuzhi, ZHANG Xiaomin, WANG Anyi, *et al*. Research progresses on channel modeling and simulation for underwater acoustic communication and networks[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(4): 1249–1261. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.04.002.

[3] RADOSEVIC A, AHMED R, DUMAN T M, *et al*. Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(2): 357–370. doi: 10.1109/JOE.2013.2253212.

[4] WAN Lei, ZHOU Hao, XU Xiaoka, *et al*. Adaptive modulation and coding for underwater acoustic OFDM[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(2): 327–336. doi: 10.1109/JOE.2014.2323365.

[5] QIAO Gang, XIAO Yuzhu, WAN Lei, *et al*. Analysis of SNR metrics for a typical underwater acoustic OFDM system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 183565–183579. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960304.

[6] ZHANG Rongxin, MA Xiaoli, WANG Deqing, *et al*. Adaptive coding and bit-power loading algorithms for underwater acoustic transmissions[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(9): 5798–5811. doi: 10.1109/TWC.2021.3070363.

[7] SU Wei, LIN Jiamin, CHEN Keyu, *et al*. Reinforcement learning-based adaptive modulation and coding for efficient underwater communications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 67539–67550. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2918506.

[8] 罗亚松, 许江湖, 胡洪宁, 等. 正交频分复用传输速率最大化自适应水声通信算法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(12): 2872–2876. doi: 10.11999/JEIT150440.
LUO Yasong, XU Jianghu, HU Hongning, *et al*. Research on self-adjusting OFDM underwater acoustic communication algorithm for transmission rate maximization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(12): 2872–2876. doi: 10.11999/JEIT150440.

[9] FU Qiang and SONG Aijun. Adaptive modulation for underwater acoustic communications based on reinforcement learning[C]. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, Charleston, USA, 2018: 1–8. doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604746.

[10] 殷敬伟, 高新博, 韩笑, 等. 稀疏贝叶斯学习水声信道估计与脉冲噪声抑制方法[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 813–824. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2021.06.004.
YIN Jingwei, GAO Xinbo, HAN Xiao, *et al*. Underwater acoustic channel estimation and impulsive noise mitigation based on sparse Bayesian learning[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(6): 813–824. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2021.06.004.

[11] MA Lu, LI Tao, LIU Songzuo, *et al*. Efficient interpolation based OMP for sparse channel estimation in underwater acoustic OFDM[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 172: 107606. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107606.

[12] 殷敬伟, 吴雨珊, 韩笑, 等. 北极冰水混合水域的水声信道预测技术[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1496–1504. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.09.006.
YIN Jingwei, WU Yushan, HAN Xiao, *et al*. Underwater acoustic channel prediction in Arctic ice-water mixed waters[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(9): 1496–1504. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.09.006.

[13] 吴雨珊. 自适应调制与功率分配的OFDM水声通信技术[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2019.
WU Yushan. Adaptive modulation and power allocation for OFDM underwater acoustic communication[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2019.

[14] QIAO Gang, LIU Lei, MA Lu, *et al*. Adaptive downlink OFDMA system with low-overhead and limited feedback in time-varying underwater acoustic channel[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 12729–12741. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2892812.

[15] RADOSEVIC A, DUMAN T M, PROAJIS J G, *et al*. Adaptive OFDM for underwater acoustic channels with limited feedback[C]. 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), Pacific Grove, USA, 2011: 975–980. doi: 10.1109/ACSSC.2011.6190156.

[16] ZHANG Yuzhi, HUANG Yi, WAN Lei, *et al*. Adaptive OFDMA with partial CSI for downlink underwater acoustic communications[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2016, 18(3): 387–396. doi: 10.1109/JCN.2016.000054.

[17] 张育芝, 孙彦景, 王斌, 等. 基于反馈信道状态信息的水声自适应OFDMA[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2321–2331. doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2021.08.35.
ZHANG Yuzhi, SUN Yanjing, WANG Bin, *et al*. Underwater acoustic adaptive OFDMA based on feedback channel state information[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(8): 2321–2331. doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2021.08.35.

[18] MA Hui, JIAO Jianzhou, CHEN Jianmei, *et al*. A fast channel state information feedback scheme based on compressive sensing for underwater acoustic MIMO systems[C]. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China, 2016: 5003–5007. doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554131.

[19] HUANG Xiaopeng and LIU Yong. Capacity criterion-based power allocation for OFDM cooperative underwater acoustic communications with limited feedback[C]. 2012 Oceans, Hampton Roads, USA, 2012: 1–4. doi: 10.1109/OCEANS.2012.6404796.

[20] HAN Y, SHIN W, and LEE J. Projection-based differential feedback for FDD massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 202–212. doi: 10.1109/TVT.2016.2542195.

[21] JANG J, LEE H, HWANG S, *et al*. Deep learning-based limited feedback designs for MIMO systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(4): 558–561. doi: 10.1109/LWC.2019.2962114.

[22] LI Baosheng, ZHOU Shengli, STOJANOVIC M, *et al*. Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(2): 198–209. doi: 10.1109/JOE.2008.920471.

刘淞佐：男，教授，研究方向为水声通信技术、水声侦察技术、嵌入式开发等.
韩　雪：女，硕士生，研究方向为水声高速通信等.
马　璐：女，教授，研究方向为水声高速通信、水声多用户通信、水声通信网络、嵌入式开发等.
徐金颉：男，研究方向为水声高速通信等.
杨　洋：女，博士生，研究方向为水声高速通信等.

责任编辑：　马秀强