

基于叠加训练序列和低复杂度频域Turbo均衡的时变水声信道估计和均衡

杨光^① 丁寒雪^{*①} 郭庆华^② 颜琪^① 王辛杰^①

^①(青岛理工大学信息与控制工程学院 青岛 266520)

^②(伍伦贡大学电气计算机与电信工程学院 伍伦贡 2522)

摘要: 针对时变水声信道估计和均衡问题, 该文提出基于叠加训练序列(ST)和低复杂度频域Turbo均衡(LTE)的时变水声信道估计和均衡(ST-LTE)算法。基于叠加训练序列方案, 将训练序列和符号线性叠加, 使得训练序列和符号信道信息一致; 基于最小二乘算法, 进行信道估计。基于频域训练序列干扰消除技术, 在频域消除训练序列对符号的干扰; 基于频域线性最小均方误差(LMMSE)均衡算法, 通过先验、后验、外均值和方差的计算, 实现低复杂度信道均衡(符号估计); 基于Turbo均衡算法, 软重构叠加训练序列和更新信道估计, 进行均衡器和译码器的信息交换, 利用编码冗余信息, 大幅度提升信道均衡性能。进行仿真、水池静态通信试验(通信频率12 kHz, 带宽6 kHz, 采样频率96 kHz, 符号传输速率4.8 ksym/s, 训练序列和符号的功率比为0.25:1)和胶州湾运动通信试验(通信频率12 kHz, 带宽6 kHz, 采样频率96 kHz, 符号传输速率3 ksym/s, 训练序列和符号的功率比为0.25:1), 仿真和试验结果验证了所提算法的有效性。

关键词: 运动水声通信; 时变水声信道; 叠加训练序列; 低复杂度频域均衡; Turbo均衡

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0850-07

DOI: [10.11999/JEIT200315](https://doi.org/10.11999/JEIT200315)

Estimation and Equalization of Time-varying Underwater Acoustic Channel Based on Superimposed Training and Low-complexity Turbo Equalization in Frequency Domain

YANG Guang^① DING Hanxue^① GUO Qinghua^② YAN Qi^① WANG Xinjie^①

^①(School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

^②(School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering,
University of Wollongong, Wollongong 2522, Australia)

Abstract: To solve the problems of time-varying underwater acoustic channel estimation and equalization, an estimation and equalization algorithm of time-varying underwater acoustic channel based on Superimposed Training (ST) and Low-complexity Turbo Equalization (LTE) in frequency domain (ST-LTE) is proposed. Based on the ST scheme, the training sequence and symbols are linearly superimposed to make the channel information of the training sequence and symbols consistent; Based on the least square algorithm, channel estimation is performed. Based on the interference elimination technique of training sequence in frequency domain, the interference of training sequence on symbols is eliminated in frequency domain; Based on the Linear Minimum Mean Square Error (LMMSE) equalization algorithm in frequency domain, the low-complexity channel equalization (symbol estimation) is realized by the calculation of prior, posterior, extrinsic mean and variance; Based on the Turbo equalization algorithm, soft reconstruction of superimposed training and update of channel estimation are conducted, the information exchange between equalizer and decoder is also carried out

收稿日期: 2020-04-28; 改回日期: 2020-12-09; 网络出版: 2021-01-04

*通信作者: 丁寒雪 edit231@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771271), 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MF010, ZR2020MF001), 青岛市源头创新计划-青年专项(19-6-2-4-cg), 山东省高等学校科学技术(J18KA315)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771271), The General Project of Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020MF010, ZR2020MF001), Qingdao Source Innovation Program - Special Project for Young Scholars (19-6-2-4-cg), Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (J18KA315)

and the performance of channel equalization is extremely improved by using coding redundancy information. Simulation, static communication experiment in a pool (communication frequency is 12 kHz, bandwidth 6 kHz, the sampling frequency 96 kHz, the transmission rate of symbols 4.8 ksym/s and the power ratio of the training sequence on symbols 0.25:1) and moving communication experiment in Jiaozhou Bay (communication frequency is 12 kHz, bandwidth 6 kHz, the sampling frequency 96 kHz, the transmission rate of symbols 3 ksym/s and the power ratio of the training sequence on symbols 0.25:1) are carried out and simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Moving underwater acoustic communication; Time-varying underwater acoustic channel; Superimposed Training (ST); Low-complexity equalization in frequency domain; Turbo equalization

1 引言

水声通信技术广泛应用于海洋油气资源勘探、海洋污染监测、水下救援、水下潜器定位导航和水下作战等任务。当收发节点相对运动时, 节点间的水声信道结构随时间变化剧烈, 使得训练序列和符号的信道信息不再一致, 造成解码性能降低甚至失效^[1,2]。

针对信道估计和均衡问题, 国外的麻省理工学院、密苏里大学、国内的中科院声学所、哈尔滨工程大学、西北工业大学、浙江大学、厦门大学和东南大学等研究机构进行了相关研究^[3-17]。国外, 密苏里大学Chen等人^[3]提出了频域Turbo均衡算法, 降低了均衡的计算复杂度。麻省理工学院Tadayon等人^[4]提出了基于路径识别的高效稀疏信道估计算法, 性能优于最小二乘(Least Square, LS)算法, 与正交匹配追踪算法性能相当。国内, 厦门大学Zhou等人^[5]提出了同步正交匹配追踪算法, 解决了长时延扩展稀疏水声信道的估计问题。哈尔滨工程大学殷敬伟等人^[6,7]进行了盲虚拟多途干扰消除研究, 基于卡尔曼滤波实现了源码最优检测, 后又提出了迭代计算架构下的基于LS算法和内嵌数字锁相环的判决反馈均衡算法, 实现了信道估计和频域信道均衡^[8]。中科院声学所唐怀东和西北工业大学景连友等人^[9,10]提出了软迭代的信道估计算法和软判决的信道均衡算法; 东南大学Tao等人^[11,12]提出了高效的基于预编码的频域Turbo均衡算法和稀疏递归最小二乘均衡算法; 中科院声学所奚钧壹等人^[13,14]提出了盲双向Turbo均衡算法, 随后又提出了频域和时域混合的Turbo均衡算法^[15]; 西北工业大学Han等人^[16]提出了基于正交信分复用的时变信道下频域Turbo均衡算法; 浙江大学Qin等人^[17]提出了稀疏贝叶斯迭代信道估计和Turbo均衡算法; 这些算法都获得了良好的效果。总的来说, 上述信道估计算法都是基于传统的插入训练序列方式进行的平均信道估计, 当训练序列和符号信道信息不一致时, 上述所提算法性能降低或不再适用。Turbo均衡类算法是近几年均衡算法的主流。

本文提出基于叠加训练序列(Superimposed Training, ST)和低复杂度频域Turbo均衡(Low-complexity Turbo Equalization in frequency domain, LTE)的时变水声信道估计和均衡(estimation and equalization of time-varying underwater acoustic channel based on Superimposed Training and Low-complexity Turbo Equalization in frequency domain, ST-LTE)算法, 解决时变水声信道估计和均衡问题。基于ST方案, 将小功率的训练序列和符号线性叠加在一起, 使得训练序列一直传输, 仅损失较小功率, 却极大提升了时变信道的追踪能力; 基于LS算法, 进行信道估计。基于频域训练序列干扰消除技术, 在频域消除训练序列对符号的干扰; 基于频域线性最小均方误差(Linear Minimum Mean Square Error, LMMSE)均衡算法, 实现低复杂度信道均衡(符号估计); 基于Turbo均衡算法, 进行均衡器和译码器的信息交换, 利用编码冗余信息, 大幅度提升信道均衡性能。最后, 仿真和试验验证了ST-LTE算法的有效性。全文上标T和上标H分别表示转置和共轭转置。

2 系统模型

基带通信系统如图1。发射端, 对源码 \mathbf{b} 进行Turbo编码和交织, 得到 \mathbf{c} , QPSK映射后, 得到符号 \mathbf{s} , 将训练序列 \mathbf{t} 线性叠加符号 \mathbf{s} 发出。接收端, (1)对接收信号进行低通滤波得到时域接收信号 \mathbf{y} 和频域接收信号 \mathbf{z}_1 ; (2)分成3条支路: 一是基于LS算法得到信道初估计值 $\hat{\mathbf{h}}$; 二是基于时域接收信号 \mathbf{y} 和信道初估计值 $\hat{\mathbf{h}}$, 估计出噪声功率 $\hat{\sigma}^2$ (所提算法发射信号功率为1, 接收信号功率减去估计出的信道能量得到噪声功率估计值); 三是频域接收信号 \mathbf{z}_1 减去基于信道初估计重构的频域训练序列干扰, 得到消除训练序列干扰后的频域接收信号 \mathbf{z}_2 。这3条支路进入均衡器; (3)进行Turbo均衡, 如图2; (4)当相邻均衡结果小于某一设定阈值时, 解码判决, 输出最终估计数据 $\hat{\mathbf{b}}$ 。

Turbo均衡如图2。(1)基于信道初估计 $\hat{\mathbf{h}}$ 、噪

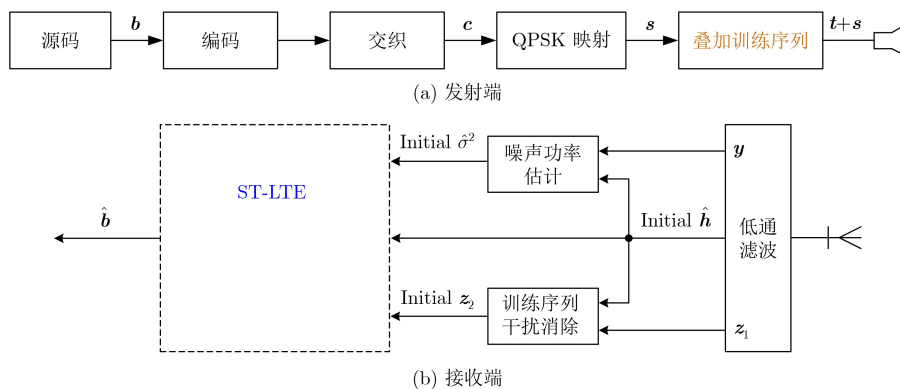


图1 基带通信系统

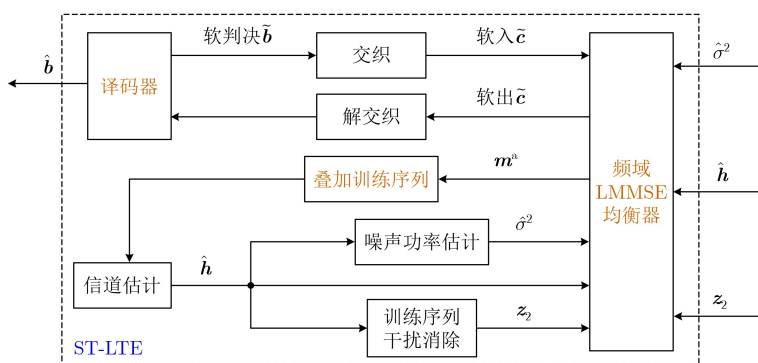


图2 Turbo均衡

声功率估计 $\hat{\sigma}^2$ 和消除训练序列干扰后的频域接收信号 z_2 , 进行频域LMMSE均衡, 即对消除训练序列干扰后的频域接收信号进行先验、后验、外(extrinsic)均值和方差运算; (2)将均衡后的软信息分成两条支路处理: 一是进行解交织和译码运算, \hat{b} 进行交织, \tilde{c} 作为均衡器软输入; 二是训练序列叠加先验均值 $m^a = [m_1^a, m_2^a, \dots, m_{N_s}^a]^T$, 联合时域接收信号 y , 基于LS算法重新进行信道估计、训练序列干扰消除和噪声功率估计; (3)将新估计出的水声信道值 \hat{h} 、消除训练序列干扰后的频域接收信号 z_2 、噪声功率估计值 $\hat{\sigma}^2$ 以及译码交织后的 \tilde{c} 作为输入数据进行频域LMMSE信道均衡、解交织和译码, 完成1次迭代计算。

3 ST-LTE算法原理

3.1 基于ST方案的信道估计

交织比特 $c_n = [c_n^1, c_n^2, \dots, c_n^Q]$, c_n^q 为随机变量, $c_n^q \in \{0, 1\}$ 。符号 $s_n \in \chi = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{2Q}\}$, χ_q^0 和 χ_q^1 代表所有 $\alpha_n = [\alpha_n^1, \alpha_n^2, \dots, \alpha_n^Q]$ 的子集, α_n^q 为随机变量 c_n^q 的具体取值。因采用QPSK映射, 所以 $\alpha_n = [\alpha_n^1, \alpha_n^2]$, $s_n \in \chi = 1/\sqrt{2} \{(1, -1), (1, 1), (-1, -1), (-1, 1)\}$ 。传输信息由训练序列 $t = [t_1, t_2, \dots, t_T]^T$ 和符号 $s = [s_1, s_2, \dots, s_{N_s}]^T$ 构成, T 为训练序列周期长度, N_s 为 T 的倍数, 训练序列需延拓和符号等长后

再进行叠加, 训练序列和符号叠加功率比为 r , 假定信道循环矩阵为 H , 信道高斯白噪声为 w 。则接收信号可表示为

$$y = H(rt + s) + w = Hs + rHt + w \quad (1)$$

当观测窗口长度 $Ns = pT$ 时, $y = [y_T, y_{2T}, \dots, y_{pT}]^T$ 。定义 L 为信道阶数, $T \geq L$, 则训练序列形成 $T \times L$ 的Toeplitz矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} t_0 & t_{T-1} & \dots & t_{T-L+1} \\ t_1 & t_0 & \dots & t_{T-L+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{T-1} & t_{T-2} & \dots & t_{T-L} \end{bmatrix}_{T \times L} \quad (2)$$

基于LS算法, 可得信道估计为

$$\hat{h} = (A^H A)^{-1} A^H \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{iT}^T \right\} \quad (3)$$

F 为标准DFT矩阵, 第 (m, n) 个元素为 $N^{-1/2} e^{-j2\pi mn/N}$, $j = \sqrt{-1}$ 。对 H 进行对角化处理, 可得

$$H = F^H D F \quad (4)$$

根据式(1)和式(4), 可得频域接收信号

$$z_1 = Fy = FF^H D F(rt + s) + Fw \quad (5)$$

因 F 是酉阵, 所以

$$F^H = F^{-1} \quad (6)$$

$$z_1 = DFs + rDFt + Fw \quad (7)$$

进行频域训练序列干扰消除, 可得

$$z_2 = z_1 - F\hat{h} * Ft \approx DFs + w' \quad (8)$$

其中, $F(rDt) - F\hat{h} * Ft \approx 0$, $w' = F(rDt) - F\hat{h} * Ft + Fw$ 。基于信道估计, 通过补0, 将信道估计长度从 L 扩展到 N_s , 构建出对角矩阵^[18]

$$\hat{D} = F\hat{h}F^H = \text{Diag} \{ \hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_{N_s} \} \quad (9)$$

$$[\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_{N_s}]^T = \sqrt{N_s}F\hat{h} \quad (10)$$

3.2 基于LTE算法的低复杂度信道均衡

基于文献[18], 得到先验、后验、外均值和方差的计算公式, 通过上标 a, p, e 区分先验、后验、外均值和方差。先验、后验、外均值和方差为

$$\left. \begin{aligned} m_n^a &= \frac{1}{\sqrt{2}} \tanh \left(\frac{L^a(\alpha_n^1)}{2} \right) + j \frac{1}{\sqrt{2}} \tanh \left(\frac{L^a(\alpha_n^2)}{2} \right) \\ \nu_n^a &= 1 - |m_n^a|^2 \\ \nu_1^p &= \nu_2^p = \dots = \nu_{N_s}^p = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} \left(\frac{1}{\bar{\nu}} + \frac{|\hat{d}_k|^2}{\hat{\sigma}^2} \right)^{-1} \\ m^p &= m^a + F^H \hat{D}^H \left(\frac{\hat{\sigma}^2}{\bar{\nu}} I + \hat{D} \hat{D}^H \right)^{-1} (z_2 - \hat{D} F m^a) \\ \nu_n^e &= \left(\frac{1}{\nu_n^p} - \frac{1}{\nu_n^a} \right)^{-1} \\ m_n^e &= \nu_n^e \left(\frac{m_n^p}{\nu_n^p} - \frac{m_n^a}{\nu_n^a} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$L^e(\alpha_n^1)$ 和 $L^e(\alpha_n^2)$ 的初值为0, $\bar{\nu} = 1/N_s \sum_{n=1}^{N_s} \nu_n^a$ 。整合外均值和方差可得 α_n^1 与 α_n^2 的外对数似然比

$$\left. \begin{aligned} L^e(\alpha_n^1) &= 2\sqrt{2} \text{Re} [m_n^e / \nu_n^e] \\ L^e(\alpha_n^2) &= 2\sqrt{2} \text{Im} [m_n^e / \nu_n^e] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将外对数似然比进行解交织、BCJR译码, 输出软信息, 进行交织, 输入均衡器, 当相邻均衡结果小于某一设定阈值时, 进行BCJR译码数据的硬判决, 得到源码估计值 \hat{b} 。

均衡器的计算量级由式(11)决定, $\frac{\hat{\sigma}^2}{\bar{\nu}} I + \hat{D} \hat{D}^H$

计算结果为对角阵, 对角阵求逆为除法运算, 计算量级为每符号常数级; $z_2 - \hat{D} F m^a$, 其中 $F m^a$ 的计算量级最大, $F m^a$ 可由快速傅里叶变换实现, 快速傅里叶变换的计算量级为每符号对数级; $F^H \left\{ \hat{D}^H \left(\frac{\hat{\sigma}^2}{\bar{\nu}} I + \hat{D} \hat{D}^H \right)^{-1} (z_2 - \hat{D} F m^a) \right\}$, 括号内为一个列向量, 将该列向量进行共轭转置和快速傅里叶变换, 再进行共轭转置, 完成该式的计算, 整体计算量级仍为每符号对数级。因此频域LMMSE均衡算法的计算量级仅为每符号对数级。

4 仿真与试验

仿真和试验均采用训练序列和符号线性叠加、1/2码率(5,7)卷积码编码、BCJR译码和QPSK映射。训练序列和符号的功率比为0.25:1, 接收信号结构如图3。仿真采用基带通信; 试验采用通频带通信, 采用单载波调制解调通信方式, 中心频率12 kHz, 带宽6 kHz, 采样频率96 kHz。

4.1 计算机仿真

1块数据为1024 bit, 共发射100块。水声信道如图4, 噪声为高斯白噪声。ST-LTE算法解码性能如图5, 图5(a)是不同信噪比和功率比下解码性能, 横轴表示迭代次数, 纵轴表示误码率, 蓝色五角星表示信噪比为9 dB的解码性能, 粉色方块表示信噪比为11 dB的解码性能。随着信噪比增加, 解码性能提升; 随着叠加功率比增加, 解码性能提升, 当叠加功率比大于0.15:1后, 解码性能提升缓慢, 考虑到外场通信的复杂性, 本文后续都采用了叠加功率比0.25:1。图5(b)是6 dB, 7 dB, 9 dB和11 dB 4种信噪比下的解码性能, 横轴表示迭代次数, 纵轴表示误码率, 蓝线五角星表示ST-LTE算法的解码性能, 粉色方块表示插入训练序列(inserted training)方案结合LTE的解码性能上限(直接采用图4的信道信息)。随着信噪比增加, ST-LTE算法解码性能逐渐接近插入训练序列方案的性能上限。在11 dB时, ST-LTE算法已具有良好的解码性能, 3次迭代计算后全部正确解码; 在6 dB时, ST-LTE算法失效。总的来说, 随着SNR增加或迭代次数增加, ST-LTE算法的解码误码率降低。

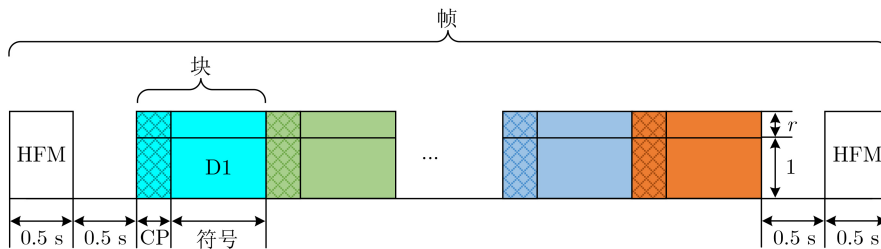


图3 接收信号结构

4.2 短途静态水声通信试验

2019年1月，在哈尔滨工程大学信道水池进行

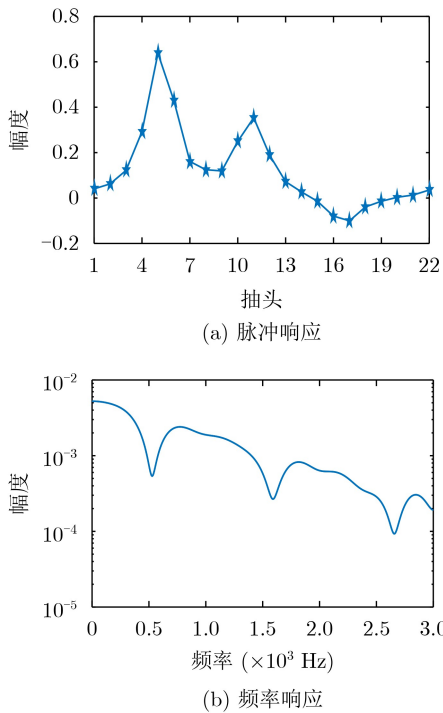
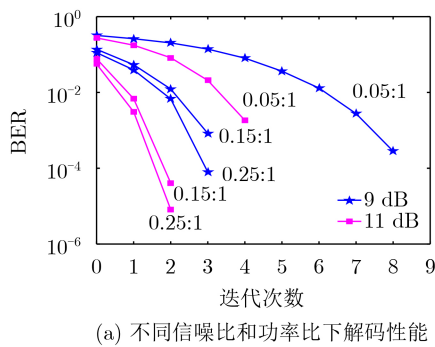


图4 水声信道的响应



了试验，收发节点水平距离7 m，布放深度随机。训练序列一个周期长度为256，发送1帧数据，1帧含有16块，每块1024 bit，每块均含有1/4循环前缀，符号传输速率4.8 ksym/s。瞬时随机水池信道如图6(a)。迭代次数和误码率关系如图6(b)，横轴为迭代次数，纵轴为误码率，一条曲线为1块数据的解码性能曲线，第3次迭代计算后，16块数据皆正确解码。试验结果表明所提算法是有效的。

4.3 长途胶州湾运动水声通信试验

2019年11月，在黄海胶州湾进行了运动水声通信试验。试验当天多云转阴，4~6 °C，东风2级。发射船长17.8 m，宽4 m，接收船长20 m，宽4 m，收发船均配有220 V，3000 W发电机，保障设备供电。试验布放如图7，接收船和发射船初始水平距离700 m，接收船锚定，发射船以0.6 m/s的速度向远离接收船的方向漂流，共3个航次，通信有效距离为700~1100 m。发射船所在海域水深大约9 m，接收船所在海域水深12.6 m，水听器和换能器都放置于水下4 m。3个航次共发送4帧数据，每帧16块，每块1024 bit，每块均含有1/1循环前缀，符号传输速率3 ksym/s。

实测水声信道瀑布图如图7(b)。采用双曲调频

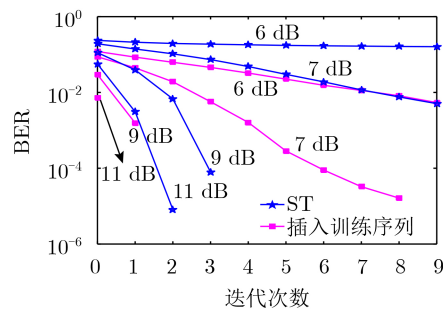


图5 解码误码率

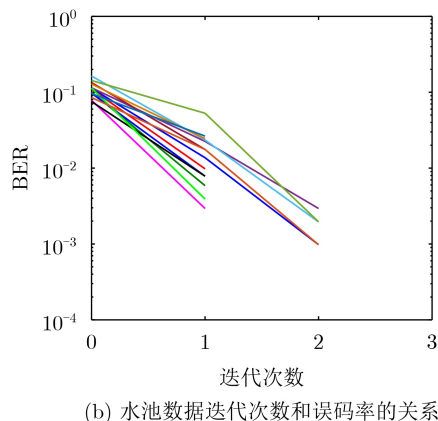
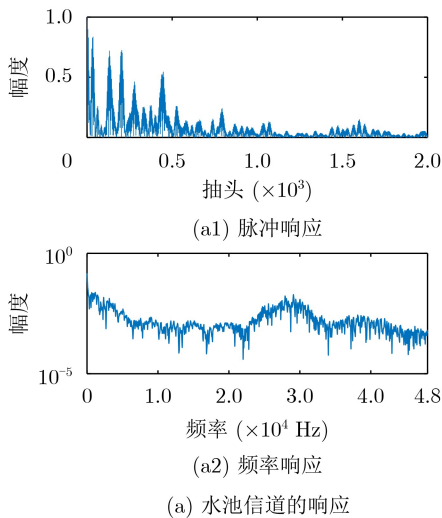


图6 水池试验

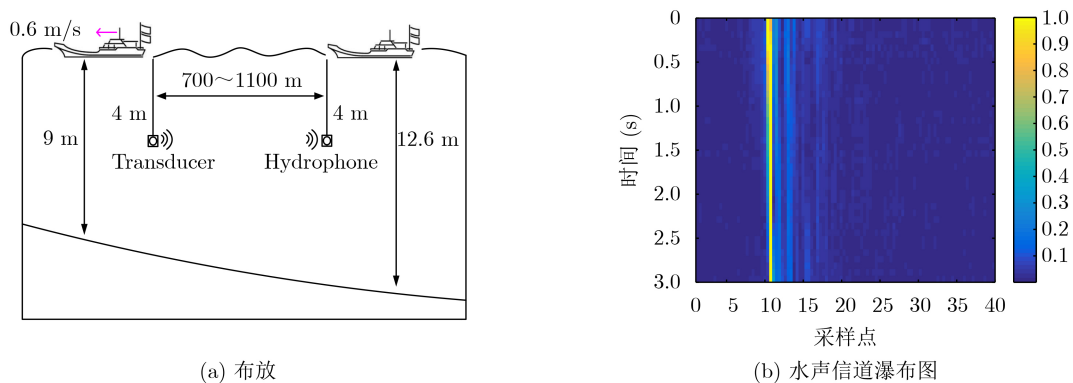
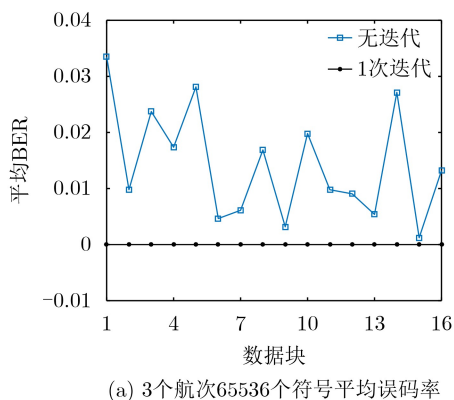


图7 胶州湾试验

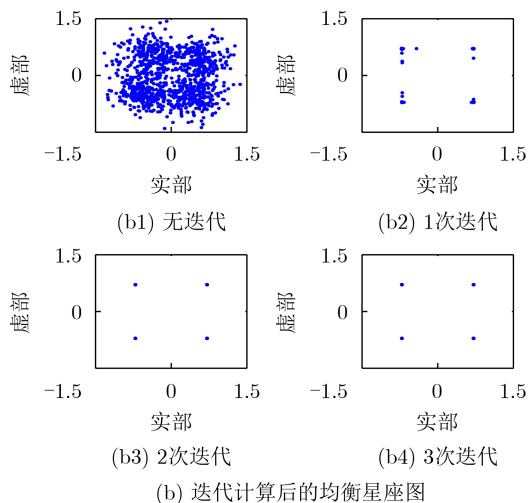
信号进行多普勒频偏消除。同步头和同步尾抓取后，求出同步头和同步尾的长度，除以发射信号同步头和同步尾的长度，得到多普勒频偏系数，进行接收信号重采样，对截取含同步头和同步尾的接收信号进行几次相同处理，消除接收信号拉伸和压缩的影响，得到消除多普勒频偏的接收信号，重新进行同步头抓取，此时的同步头用于提取接收信号中的通频带传输数据。试验结果如图8，图8(a)是3个航次65536个符号平均误码率性能，横轴为数据块个数(横轴16块，每块都对应4096个符号的平均误码率)，纵轴为平均误码率，迭代1次计算后，4帧

数据全部正确解码。发送数据随机生成，因此不失一般性，取第1帧做均衡性能分析，如图8(b)，迭代计算1次后，第1帧数据全部正确解码，迭代计算2次后，均衡性能基本达到最佳。

总的来说，在相对速度0.6 m/s条件下，3个航次共发射65536个符号，符号传输速率3 ksym/s，迭代计算1次后，发送数据全部正确解码，实现了1 km水下运动节点间可靠运动水声通信。试验采用实时发送、实时解码的方式去验证ST-LTE算法的有效性，所提算法不需调整任何参数，即可直接正确解码。



(a) 3个航次65536个符号平均误码率



(b) 迭代计算后的均衡星座图

图8 胶州湾试验结果

5 结论

本文所提ST-LTE算法，解决了时变水声信道估计和均衡问题。首先，基于ST方案，将训练序列和符号线性叠加在一起，使得训练序列和符号信道信息一致；基于LS算法，实现了水声信道有效估计。其次，基于LTE算法，实现了低复杂度可靠信道均衡(符号估计)。基于频域训练序列干扰消除算法，在频域消除训练序列对符号的干扰；基于频

域LMMSE均衡算法，进行先验、后验、外均值和方差计算，每符号计算量级仅为对数级，实现了低复杂度信道均衡；基于Turbo均衡算法，软重构叠加训练序列和更新信道估计，进行均衡器和译码器的信息交换，利用编码冗余信息，实现了低复杂度可靠信道均衡。最后，进行了仿真、水池稳态和胶州湾运动水声通信试验，试验结果验证了所提算法的有效性。ST-LTE算法不需调整任何参数，即可

直接正确解码, 可为运动水声通信技术开发, 实装水下运动平台, 提供直接借鉴。

参 考 文 献

- [1] SONG Aijun, STOJANOVIC M, and CHITRE M. Editorial underwater acoustic communications: Where we stand and what is next?[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(1): 1–6. doi: [10.1109/JOE.2018.2883872](https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2883872).
- [2] YANG T C. Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(1): 129–145. doi: [10.1121/1.3664053](https://doi.org/10.1121/1.3664053).
- [3] CHEN Zhenrui, WANG Jintao, and ZHENG Y R. Frequency-domain turbo equalization with iterative channel estimation for MIMO underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 42(3): 711–721. doi: [10.1109/JOE.2016.2600106](https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2600106).
- [4] TADAYON A and STOJANOVIC M. Iterative sparse channel estimation and spatial correlation learning for multichannel acoustic OFDM systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(4): 820–836. doi: [10.1109/JOE.2019.2932662](https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2932662).
- [5] ZHOU Yuehai, SONG Aijun, TONG F, et al. Distributed compressed sensing based channel estimation for underwater acoustic multiband transmissions[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(6): 3985–3996. doi: [10.1121/1.5042362](https://doi.org/10.1121/1.5042362).
- [6] YIN Jingwei, YANG Guang, HUANG Defeng, et al. Blind adaptive multi-user detection for under-ice acoustic communications with mobile interfering users[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(1): EL70–EL75. doi: [10.1121/1.4974757](https://doi.org/10.1121/1.4974757).
- [7] 葛威, 殷敬伟, 杨光, 等. 载波频率不一致且频谱严重交叠干扰下的盲自适应多用户检测试验研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(2): 353–360. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2019.02.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.02.015).
GE Wei, YIN Jingwei, YANG Guang, et al. Experimental research on blind adaptive multiuser detection algorithm with different carrier frequencies and severe overlapping interference of spectra[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(2): 353–360. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2019.02.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.02.015).
- [8] YIN Jingwei, GE Wei, HAN Xiao, et al. Frequency-domain equalization with interference rejection combining for single carrier multiple-input multiple-output underwater acoustic communications[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 147(2): EL138–EL143. doi: [10.1121/10.0000711](https://doi.org/10.1121/10.0000711).
- [9] 景连友, 何成兵, 张玲玲, 等. 水声通信中基于软判决的块迭代判决反馈均衡器[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(4): 885–891. doi: [10.11999/JEIT150669](https://doi.org/10.11999/JEIT150669).
JING Lianyou, HE Chengbing, ZHANG Lingling, et al. Iterative block decision feedback equalizer with soft detection for underwater acoustic channels[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 885–891. doi: [10.11999/JEIT150669](https://doi.org/10.11999/JEIT150669).
- [10] 唐怀东, 朱敏, 武岩波. 一种水声通信Turbo均衡中的软迭代信道估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(3): 677–682. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00820](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00820).
TANG Huaidong, ZHU Min, and WU Yanbo. An algorithm of soft iterative channel estimation for turbo equalization of underwater acoustic communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 677–682. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00820](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00820).
- [11] TAO Jun. DFT-precoded MIMO OFDM underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(3): 805–819. doi: [10.1109/JOE.2017.2735590](https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2735590).
- [12] QIN Zhen, TAO Jun, WANG Xiaoyan, et al. Direct adaptive equalization based on fast sparse recursive least squares algorithms for multiple-input multiple-output underwater acoustic communications[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(4): EL277–EL283. doi: [10.1121/1.5096630](https://doi.org/10.1121/1.5096630).
- [13] 奚钧壹, 鄢社锋, 徐立军, 等. 水声通信系统中双向turbo均衡算法[J]. *声学学报*, 2018, 43(5): 771–778. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2018.05.006](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2018.05.006).
XI Junyi, YAN Shefeng, XU Lijun, et al. Bidirectional turbo equalization for underwater acoustic communications[J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(5): 771–778. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2018.05.006](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2018.05.006).
- [14] XI Junyi, YAN Shefeng, and XU Lijun. Direct-adaptation based bidirectional turbo equalization for underwater acoustic communications: Algorithm and undersea experimental results[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(5): 2715–2728. doi: [10.1121/1.5036730](https://doi.org/10.1121/1.5036730).
- [15] XI Junyi, YAN Shefeng, XU Lijun, et al. Frequency-time domain turbo equalization for underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(2): 665–679. doi: [10.1109/JOE.2019.2891171](https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2891171).
- [16] HAN Jing, CHEPURI S P, ZHANG Qunfei, et al. Iterative per-vector equalization for orthogonal signal-division multiplexing over time-varying underwater acoustic channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(1): 240–255. doi: [10.1109/JOE.2017.2787898](https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2787898).
- [17] QIN Xiangzhao, QU Fengzhong, and ZHENG Y R. Bayesian iterative channel estimation and turbo equalization for multiple-input-multiple-output underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(1): 326–337. doi: [10.1109/JOE.2019.2956299](https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2956299).
- [18] GUO Qinghua, HUANG Defeng, NORDHOLM S, et al. Iterative frequency domain equalization with generalized approximate message passing[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(6): 559–562. doi: [10.1109/LSP.2013.2256783](https://doi.org/10.1109/LSP.2013.2256783).

杨光: 男, 1981年生, 博士, 讲师, 研究方向为水声通信。

丁寒雪: 女, 1998年生, 硕士生, 研究方向为水声通信。

郭庆华: 男, 1978年生, 博士, 副教授, IEEE高级会员, 研究方向为水声通信和无线通信。

颜琪: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为水声通信。

王辛杰: 男, 1980年生, 博士, 讲师, 研究方向为水声通信。

责任编辑: 马秀强