

## 正交频分复用传输速率最大化自适应水声通信算法研究

罗亚松<sup>\*①</sup> 许江湖<sup>①</sup> 胡洪宁<sup>①</sup> 贺静波<sup>①</sup> 陈占伟<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

<sup>②</sup>(海军青岛水警区后勤部舰艇教练室 青岛 266102)

**摘要:** 该文在对正交频分复用(OFDM)水声通信速率最大化问题建模基础上,对注水算法的运算量进行了合理简化,实现了对子载波初始能量的快速分配。针对固定判决门限离散比特分配算法存在的码元能量严重浪费和速率损失问题,提出了基于贪婪的比特分配方案,以较小的计算量代价实现了OFDM通信速率的显著提高。研究表明,在压缩信道编码的不完全信道估计下,新算法仍具有良好的通信速率及误码率性能,适用于时变水声信道。

**关键词:** 水声通信; 正交频分复用(OFDM); 自适应; 注水算法

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)12-2872-05

DOI: 10.11999/JEIT150440

## Research on Self-adjusting OFDM Underwater Acoustic Communication Algorithm for Transmission Rate Maximization

Luo Ya-song<sup>①</sup> Xu Jiang-hu<sup>①</sup> Hu Hong-ning<sup>①</sup> He Jing-bo<sup>①</sup> Chen Zhan-wei<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(*Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

<sup>②</sup>(*Coach Division of Logistic Department, Navy Qingdao Marine Area, Qingdao 266102, China*)

**Abstract:** Based on the modeling of transmission rate maximization problem for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) underwater acoustic communication, the computing amount for water-filling algorithm is reduced reasonably, which realizes rapid assignments for sub-carriers' initial energy. To deal with the serious waste of symbol energy existing in the bit assigning algorithm based on fixed threshold, the new greedy algorithm is brought forward, which improves the OFDM transmission rate remarkably with less cost of additional calculation. Results show that the new algorithm behaves favorable properties of transmission rate and Bit Error Rate (BER) even with incomplete channel estimation information suitable for time-variant underwater acoustic channel.

**Key words:** Underwater acoustic communication; Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Self-adjusting; Water-filling algorithm

### 1 引言

正交频分复用(OFDM)水声通信技术在水下系统中得到了广泛重视与应用<sup>[1]</sup>,基于信道估计的OFDM自适应调制技术已成为恶劣水声信道环境中实现有效数据传输的重点研究方向<sup>[2]</sup>。随着人类水下探索活动日益增多,对水声通信速率的需求也不断增大,如何充分利用水声信道资源,在有限的水声信道带宽内实现OFDM水声通信系统的速率最大化,是OFDM水声通信领域值得关注的一项重要问题。

本文在对OFDM水声通信码元速率最大化问题的建模分析基础上,针对注水算法<sup>[3]</sup>运算量较大的

问题,提出了简化计算量的方法;针对文献[4]固定判决门限离散比特分配算法所带来的码元能量浪费及速率损失问题,提出了进一步提高码元速率的二次贪婪比特分配新算法,并对新算法在码元速率、计算量、不完全水声信道估计下的误码性能进行了综合分析仿真验证。

### 2 OFDM 码元速率最大化问题建模

OFDM是一种在多个正交子载波上完成并行数据传输的通信技术,每个子载波上传递的信息以该子载波上的频域值 $X(k)$ 形式出现,利用IFFT可以快速实现OFDM信源信息的调制<sup>[5]</sup>,OFDM时域通信信号为

$$x(n) = \frac{\mu}{\sqrt{V}} \sum_{k=0}^{V-1} X(k) e^{j \frac{2\pi}{V} kn} \quad (1)$$

其中, $V$ 是以频率 $f_s$ 抽样的IFFT运算点个数, $k$ 是子载波序号, $X(k)$ 是第 $k$ 个子载波上传递的信息值,

收稿日期: 2015-04-15; 改回日期: 2015-08-03; 网络出版: 2015-10-13

\*通信作者: 罗亚松 yours\_baggio@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61101205)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61101205)

第  $k$  个子载波的对应频率为

$$f_k = k \cdot f_s / V \quad (2)$$

$x(n)$  送入信道传输后, 受多径水声信道  $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]^T$  及环境噪声的综合影响, 经过 FFT 解调后, 通信接收端得到的第  $k$  个子载波上的恢复信号为

$$Y(k) = H(k)X(k) + N(k) \quad (3)$$

其中,  $H(k)$  是水声信道在子载波  $k$  上的信道响应,  $N(k)$  是子载波  $k$  的信道噪声。根据香农定理, 第  $k$  个子载波能获得的最大通信传输速率由式(4)决定,  $\text{SNR}_k$  是子载波  $k$  上的等效信噪比,  $p_k$  是子载波  $k$  上的发射能量,  $\sigma_k^2$  是噪声  $N(k)$  的能量, 为方便说明, 将  $|H(k)|^2 / \sigma_k^2$  记做  $e_k$ ,  $e_k$  可通过现有成熟的信道估计算法及噪声估计算法得到<sup>[6-8]</sup>,  $e_k$  越大, 说明该子载波上的通信环境越好, 反之, 越恶劣。

$$C(k) = \Delta f \log_2(1 + \text{SNR}_k) = \frac{f_s}{V} \log_2 \left( 1 + \frac{p_k |H(k)|^2}{\sigma_k^2} \right) \quad (4)$$

在水声信道中, 环境噪声由地壳震动噪声、船舶噪声、风浪噪声及热噪声等多种因素构成, 子载波  $k$  上的噪声大小可用式(5)衡量<sup>[9]</sup>, 其中,  $f_{kL}$  和  $f_{kH}$  分别是子载波  $k$  所占带宽的最低和最高频率。可见, 水声环境噪声具有一定的频率相关特性; 同时, 由于水声信道多径效应非常严重, 在频域上即体现为显著的频率选择性衰落<sup>[10]</sup>, 这些都导致了不同子载波信道上通信环境的巨大差异, 即  $e_k$  的剧烈起伏。

$$\sigma_k^2 = \int_{f_{kL}}^{f_{kH}} 10^{\frac{N_0}{10}} f_i^{-\frac{9}{5}} df_i \quad (5)$$

为各个子载波平均分配能量  $p_k$  的方法并没有充分考虑这种载波信道差异, 会造成速率-能耗比的低效, 为了实现 OFDM 码元通信速率的最大化, 需要根据当前水声信道的估计状态, 将有限的码元发射能量  $P$  (现在多数水下应用系统都是能量受限系统) 合理分配给所使用的  $N$  个子载波, 码元速率最大化问题即演变为公式(6)所示的条件约束下的函数极值问题,  $k_0$  是 OFDM 占用的初始子载波序号。

$$\left. \begin{aligned} \max(C) &= \sum_{k=k_0}^{k_0+N-1} C(k) \\ \sum_{k=k_0}^{k_0+N-1} p_k &\leq P, \quad p_k \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 3 基于固定门限比特分配的速率最大化算法

为实现式(6)的最优求解, 由拉格朗日乘法, 可定义目标函数为

$$f(p_k) = \frac{f_s}{V} \sum_{k=k_0}^{k_0+N-1} \log_2(1 + p_k e_k) + \lambda \left( P - \sum_{k=k_0}^{k_0+N-1} p_k \right) \quad (7)$$

对式(7)关于  $p_k$  求导, 可得

$$\frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{1}{p_k + 1/e_k} = \frac{\lambda V e_k}{f_s} \quad (8)$$

为了使式(6)的目标函数最大化,  $p_k$  应满足:

$$p_k = W - 1/e_k, \quad k = k_0, k_0 + 1, \dots, k_0 + N - 1 \quad (9)$$

其中,  $W$  是常数, 根据式(6)的码元能量约束条件, 对式(9)关于各个子载波  $k$  求和, 可得

$$W = \frac{1}{N} \left[ P + \sum_{k=k_0}^{k_0+N-1} \frac{1}{e_k} \right] \quad (10)$$

由式(9), 式(10), 利用注水算法即可实现各子载波分配能量  $p_k$  的求解, 若  $p_k \leq 0$ , 说明子载波  $k$  的信道条件过于恶劣, 不适合传递数据, 这时实际使用的子载波数  $N$  应减 1, 重新利用式(9), 式(10)迭代计算, 直到所有  $p_k > 0$  为止, 即可完成子载波能量的优化分配, 最终使用的子载波数为  $N'$ 。

上述注水方法计算得到的各子载波能量  $p_k$  可实现 OFDM 码元速率的最大化, 但是, 由此计算得到的每个子载波最大承载比特数并非整数。因此, 在实际应用中, 需要在注水方法计算的子载波能量基础上, 对各个子载波传递的比特数进行离散化分配。文献[4]给出了一种基于固定判决门限的离散比特分配方法, 其思路是, 假设各子载波均采用矩形 MQAM 调制方式传递信息<sup>[11]</sup>(模数  $M$  可变), 根据水声通信应用所要求的误码率指标  $P_e^*$ , 由式(11)反推不同模数  $M$  下 ( $M = 2, 4, 8, \dots, 256$ ), 满足  $P_e^*$  要求所需的最小等效信噪比  $\text{SNR}_M$ 。由于 OFDM 的通信误码率是由最差子载波上的误码率决定<sup>[12]</sup>, 因此, 为了达到误码率小于  $P_e^*$  的指标要求, 每个子载波  $k$  上的误码率都不应超过  $P_e^*$ 。根据上述注水算法得到的分配能量, 可计算子载波  $k$  上的信噪比  $\text{SNR}_k = p_k e_k$ , 将  $\text{SNR}_k$  与不同模数  $M$  的  $\text{SNR}_M$  (固定判决门限) 进行比较, 为实现最大的码元速率, 选择满足  $\text{SNR}_k \geq \text{SNR}_M$  的最大模数  $M$ , 作为子载波  $k$  的调制模式, 对应子载波  $k$  上的比特数为  $b_k = \log_2 M$ , 完成比特离散分配。

$$P_e^* = \begin{cases} Q[\sqrt{2\text{SNR}_M}], & M = 2 \\ 4(\sqrt{M} - 1) \cdot Q\left[\sqrt{\frac{3\text{SNR}_M}{M-1}}\right] / \sqrt{M}, & M = 4, 16, 64, 256 \\ 2\left(\frac{I-1}{I} + \frac{J-1}{J}\right) Q\left[\sqrt{\frac{6\text{SNR}_M}{I^2 + J^2 - 2}}\right], & M = 8, 32, 128 \end{cases} \quad (11)$$

#### 4 改进 OFDM 码元速率优化算法

注水算法可根据当前水声信道状况  $e_k$  的估计结果, 实现码元速率最大化的子载波能量分配, 但是, 一旦出现某个子载波的分配能量  $p_k \leq 0$ , 就需要启动新一轮迭代, 并且每次迭代都要重新计算各子载波上的发射能量。当水声信道频域起伏较大, 码元信噪比较低时, 注水算法的计算复杂度为  $O(N^2)$ , 这对于具有较大载波数  $N$  的 OFDM 水声通信系统来说, 将会造成巨大的运算压力, 不但影响水声通信实时性, 降低带宽利用率, 同时, 由于水声信道具有时、空变特性, 过长的计算时间也会影响能量分配结果的时效性。

研究发现, 码元速率最大化注水算法倾向于为信道条件良好 ( $e_k$  较大) 的子载波分配能量, 而对于信道恶劣的子载波, 分配较少、甚至不分配能量。经过第 1 轮注水算法迭代计算出的各子载波能量  $p_k$ , 虽然存在不合情理的负值, 但是分配结果已经能够较准确反映注水算法对各个子载波的分配倾向。这时可以利用第 1 轮迭代保留的  $N_+$  个子载波正值能量  $p_{k\_i}^+$  ( $k\_i$  是保留使用的子载波序号), 由式 (12), 对码元能量  $P$  进行 2 次比例分配, 可见, 此时既滤除了那些信道条件恶劣、不适宜传输的子载波 (第 1 轮分配能量小于 0), 又在码元能量约束条件下维持了精确注水算法的分配倾向, 同时将计算复杂度降为  $O(N)$ 。

$$p_{k\_i}^+ = P \cdot p_{k\_i}^+ / \sum_{i=1}^{N_+} p_{k\_i}^+, \quad i = 1, 2, \dots, N_+ \quad (12)$$

上述简化注水算法可以用较小的计算量完成各子载波能量的快速分配, 之后, 仍需要根据误码率指标  $P_e^*$  为每个子载波分配离散比特数。上述固定门限比特分配方法只是确保了每个子载波  $k\_i$  上的信噪比  $\text{SNR}_{k\_i}$  不小于  $P_e^*$  所要求信噪比门限  $\text{SNR}_{M_{k\_i}}$ , 而该子载波上超过门限的剩余能量部分既不能用于提高传输速率 (因为  $\text{SNR}_{k\_i} < \text{SNR}_{M_{k\_i \times 2}}$ ), 也不能提高整个码元的误码率性能 (由其他子载波上的最低误码率决定<sup>[12]</sup>), 能量被白白浪费。为进一步提高码元速率, 本文采用贪婪算法对子载波发射能量及比特数进行 2 次修正。算法步骤是:

步骤 1 由式 (12), 利用简化注水算法计算分配给子载波  $k\_i$  的正值能量  $p_{k\_i}^+$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_+$ 。

步骤 2 在误码率  $P_e^*$  要求下, 利用固定门限比特分配算法为子载波  $k\_i$  选择 MQAM 的调制模数  $M_{k\_i}$ 。按式 (13), 由  $M_{k\_i}$  的判决门限  $\text{SNR}_{M_{k\_i}}$ , 计算子载波  $k\_i$  达到  $P_e^*$  需要的最低发射功率  $p_{k\_i}^{+'}$ , 将  $p_{k\_i}^{+'}$  作为分配给子载波  $k\_i$  的初始功率。

$$p_{k\_i}^{+'} = 10^{\text{SNR}_{M_{k\_i}}/10} / e_{k\_i} \quad (13)$$

步骤 3  $p_{k\_i}^+$  与  $p_{k\_i}^{+'}$  之差即为子载波  $k\_i$  上的剩余能量, 由式 (14) 计算整个 OFDM 码元的剩余总能量  $P_l$ ,  $P_l$  将作为一个整体, 进行统筹分配。

$$P_l = \sum_{i=1}^{N_+} [p_{k\_i}^+ - p_{k\_i}^{+'}] \quad (14)$$

步骤 4 由式 (15) 计算每个子载波当前的比特数加 1 (调制模数  $M_{k\_i}$  加倍) 后, 需要付出的额外能量 (仍满足误码率  $P_e^*$  要求)。

$$\Delta p_{k\_i} = \left[ 10^{\text{SNR}_{(M_{k\_i} \times 2)}/10} - 10^{\text{SNR}_{M_{k\_i}}/10} \right] / e_{k\_i} \quad (15)$$

步骤 5 为了充分利用有限的码元能量获得最大的码元速率, 采用贪婪算法——选择增加 1 bit 信息所需额外能量  $\Delta p_{k\_i}$  最小的子载波  $k\_i'$  作为下一步的能量和比特分配对象。

步骤 6 如果  $P_l \geq \Delta p_{k\_i'}$ , 说明码元剩余能量可用于进一步提高码元速率, 子载波  $k\_i'$  上分配的比特数加 1, 即模数  $M_{k\_i'}$  乘 2, 同时, 利用式 (15) 更新  $\Delta p_{k\_i'}$ , 剩余总能量  $P_l$  变为  $P_l - \Delta p_{k\_i'}$ , 返回步骤 5; 如果  $P_l < \Delta p_{k\_i'}$ , 说明剩余能量以不足以提高码元速率, 贪婪算法迭代结束。

相比于固定门限比特分配算法, 贪婪比特分配算法能够将各个子载波的剩余能量统筹利用, 以最小的能量代价换取码元通信速率的最大化; 算法每次迭代即可获得 1 bit 的码元速率提升, 消耗的计算量仅为 3 次简单的数据更新运算 (步骤 6) 和 1 次比较运算 (步骤 5, 可采用排序算法), 运算效能较高。

#### 5 仿真验证

OFDM 水声通信信号带宽设为 10~20 kHz,  $f_{\text{sam}} = 100$  kHz,  $V = 1024$ , 通信使用的子载波总数  $N = 133$ 。收、发端深度分别位于 30 m 和 35 m, 水深 100 m, 通信距离 1 km, 利用 BELLHOP 算法<sup>[13]</sup>计算水声信道响应  $h$ 。

图 1 给出了不同信噪比下, 码元速率最大化精确注水算法和本文简化注水算法所得到的平均信道容量, 可见, 注水算法能够根据当前水声信道特征更为合理地分配子载波能量, 信道容量较子载波能量平均分配模式有显著提高; 同时, 当信噪比较低时, 精确注水算法较简化注水算法有更大的容量优势, 但随着信噪比的增加, 当信噪比高于 0 dB 时 (点对点水声通信通常满足), 本文简化注水算法能以较小的运算量获得与精确注水算法相当的信道容量, 更适合于在实时性要求高, 信道变化较快的水声通信中使用。

在简化注水算法子载波能量分配基础上, 图 2

给出了当误码率指标  $P_e^* = 10^{-2}, 10^{-4}$  时，采用固定门限比特分配算法及本文贪婪比特分配算法，每个 OFDM 码元能够传递的比特数，两种算法各自的归一化剩余码元能量如图 3 所示。综合图 2，图 3 可以发现，固定门限比特分配算法存在有较大的剩余能量，尤其是在信噪比较低、而误码率要求较高的恶劣条件时，码元能够发送的比特数非常有限(如图 2，图 3 的“○”)，原因在于注水算法是在连续速率流假设下进行最优能量分配，当利用固定门限算法对子载波比特数进行离散分配时，注水算法在很多恶劣子载波上的等效信噪比小于 1 bit(模 2)传输的判决门限  $SNR_0$ ，因此无法传递信息，从而造成大量的能量浪费。而本文贪婪比特分配算法能够将剩余能量统筹、充分利用，最大限度提高码元的通信速率，即使在恶劣应用条件，也会将剩余能量集中在某些信道条件相对较好的子载波上使用。图 2，图 3 仿真表明，本文贪婪比特分配算法能够最大限度地利用码元能量，在任何信噪比条件下，码元剩余能量均较小，码元传输比特数较固定门限比特分配算法有显著提高，实现了码元传输速率的优化提升。

上述仿真都是在通信发射端获得接收端位置良好的水声信道质量估计  $\bar{e} = [e_{k_0}, e_{k_0+1}, \dots, e_{k_0+N-1}]$  前提下得出的结论，然而在实际水声通信应用中，接收

端处的信道响应并不恒定，如果接收端每次都将会占用极大的通信带宽。实际上，水声信道具有典型的慢时、空变特性，在较长一段时间内，接收端水声信道响应可以近似认为是以当前信道估计结果  $\bar{e}$  为均值的指数分布规律变化<sup>[14]</sup>。基于此，接收端一般采用信道量化聚类压缩技术<sup>[15]</sup>，用较少比特数  $m$ (代表  $2^m$  个聚类中心)向发射端反馈信道估计结果。假设接收端采用  $k$  均值量化聚类压缩技术<sup>[15]</sup>，发送端根据收到的  $m$  bit 反馈信息，以聚类中心作为此时的信道估计  $\bar{e}' (\neq \bar{e})$ ，利用本文算法处理后的剩余能量如图 4 所示(误码率  $P_e^* = 10^{-4}$ )，可见，本文算法在认定的信道质量  $\bar{e}'$  下都能充分利用码元能量，剩余能量值均较小，码元传递比特数与图 2 的“\*”曲线接近，实现了传输速率提升。但是由于  $\bar{e}' \neq \bar{e}$ ，利用  $\bar{e}'$  分配的子载波能量和比特数会造成误码率指标下降。图 5 给出了时变水声信道环境下，采用不同量化位数  $m$ ，本文算法获得的实际误码率，可见，本文算法只需要较少的量化位数  $m$ ，即可达到与期望值  $P_e^* = 10^{-4}$  接近的误码率，同时，较小的  $m$  会大幅节省用于信道估计反馈的带宽，变向提高整个 OFDM 水声通信系统的吞吐率，适于时变水声信道应用。

### 6 结束语

本文研究了一种实现 OFDM 速率最大化的自

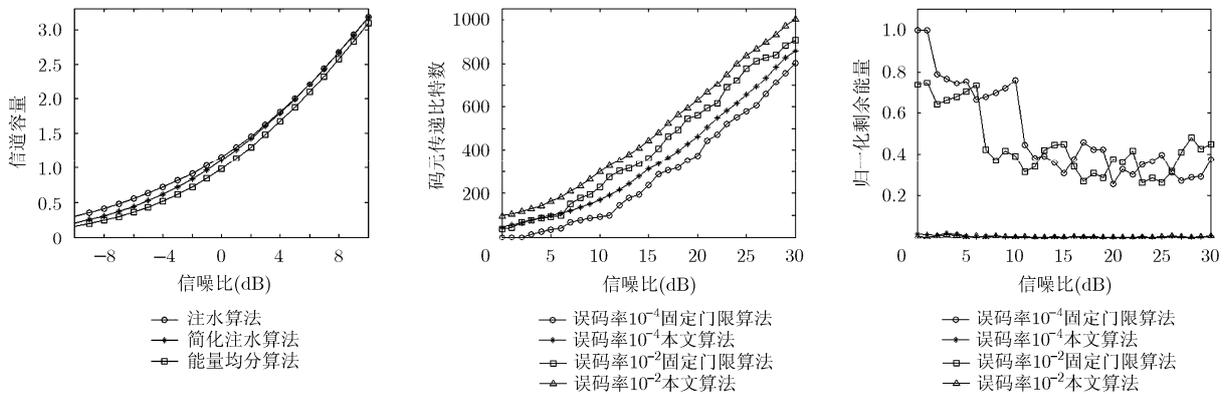


图1 不同能量分配算法的信道容量

图2 两种算法码元传递比特数比较

图3 两种算法剩余能量比较图

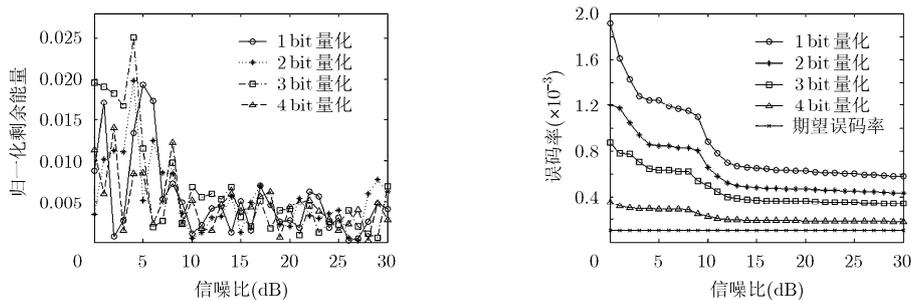


图4 不同比特信道压缩聚类后，新算法剩余能量曲线

图5 不同比特信道压缩聚类后，新算法误码率性能曲线

适应水声通信算法, 通过对注水算法的合理简化, 大幅减少了载波能量初始分配所需的运算量, 采用基于贪婪的子载波离散比特分配方法对固定门限方法的剩余能量进行统筹、合理分配, 最大限度地提高码元传递比特数。仿真证明, 新算法能够带来通信速率的显著提升, 码元能量得到了充分利用, 同时, 在有信道估计损失情况下, 算法仍具有良好的误码性能, 适合于在慢时、空变的水声信道中应用。

### 参 考 文 献

- [1] Kumar M and Tiwari S. Performance evaluation of conventional and wavelet based OFDM system[J]. *Journal of Electronics and Communication*, 2013, 67(4): 348-354.
- [2] Abdallaa A, Ferreira R, and Shahparia A. Improved nonlinear tolerance in ultra-dense WDM OFDM system[J]. *Optics Communications*, 2014, 325(1): 88-93.
- [3] 赵越, 方旭明, 黄博. 基于负载均衡的 OFDMA 双跳中继网络资源分配策略[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 94-100.  
Zhao Yue, Fang Xu-ming, and Huang Bo. Resource allocation scheme based on load balancing for OFDMA two-hop relay networks [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(1): 94-100.
- [4] Huang Xiao-peng and Lawrence V B. Capacity criterion-based bit and power loading for shallow water acoustic OFDM system with limited feedback[C]. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, Budapest, 2011: 372-377.
- [5] Xu X K, Wang Z H, Zhou S L, et al. Parameterizing both path amplitude and delay variations of underwater acoustic channels for block decoding of orthogonal frequency division multiplexing[J]. *Acoustical Society of America*, 2012, 131(6) : 4672-4679.
- [6] 罗亚松, 胡洪宁, 刘忠, 等. 基于 OFDM 信号的自适应水声信道估计算法[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(5): 678-684.  
Luo Ya-song, Hu Hong-ning, Liu Zhong, et al. Self-adjusting underwater acoustic channel estimation algorithm based on OFDM signals[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(5): 678-684.
- [7] Hai H N, Soh W S, and Motani M. A Bidirectional-Concurrent MAC protocol with packet bursting for underwater acoustic networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(3): 547-565.
- [8] Liao W H and Huang C C. SF-MAC: a spatially fair MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(6): 1686-1694.
- [9] Lei Yang and Long Zhou. Adaptive bit loading algorithm for OFDM underwater acoustic communication system[C]. 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics (CEOE 2011), Dalian, China, 2011: 350-352.
- [10] 王巍, 乔钢, 王玥, 等. 多输入多输出正交频分复用浅海水声通信打孔判决反馈信道估计算法[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1116-1124.  
Wang Wei, Qiao Gang, Wang Yue, et al. Decision feedback estimation of multiple input/multiple output orthogonal frequency division multiplexing channel based on punching technique via UWA shallow sea[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(9): 1116-1124.
- [11] Xiao Dong, Mo Fu-yuan, and Chen Geng. Study of low bit rate speech codec algorithm in underwater acoustic communication[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 2013, 32(4): 411-423.
- [12] 罗亚松, 许江湖, 刘忠, 等. 基于判决反馈均衡的水声信道估计与通信算法[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(5): 685-692.  
Luo Ya-song, Xu Jiang-hu, Liu Zhong, et al. Self-adjusting underwater acoustic channel estimation and communication algorithms based on decision feedback equalizer[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48(5): 685-692.
- [13] 张旭, 程琛, 刘艳. 西北太平洋副热带模态水形成区声传播特性分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 94-101.  
Zhang Xu, Cheng Chen, and Liu Yan. Acoustic propagation effect caused by subtropical mode water of northwestern pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(9): 94-101.
- [14] Huang Xiao-peng. Capacity criterion-based power loading for underwater acoustic OFDM system with limited feedback [C]. *Wireless Communications, Networking and Information Security*, Beijing, 2010: 54-58.
- [15] 谢娟英, 王艳娥. 最小方差优化初始聚类中心的 K-means 算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(8): 205-211.  
Xie Juan-ying and Wang Yan-e. K-means algorithm based on minimum deviation initialized clustering centers[J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(8): 205-211.

罗亚松: 男, 1982 年生, 讲师, 主要研究方向为水下自组织网络。  
许江湖: 男, 1975 年生, 讲师, 主要研究方向为水声工程。  
胡洪宁: 男, 1980 年生, 讲师, 主要研究方向为系统工程。  
贺静波: 男, 1978 年生, 讲师, 主要研究方向为水声电子对抗。  
陈占伟: 男, 1982 年生, 工程师, 主要研究方向为潜艇指挥。