

## 循环移位扩频多用户水声通信

何成兵, 荆少晶, 花飞, 席瑞, 张瑞玉, 史文涛, 张群飞

(西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 针对现有直接序列扩频码分多址 (DS-CDMA) 水声通信数据率低且接收复杂度高的问题, 提出循环移位扩频多用户通信方法。通过基于  $M$  元调制的循环移位扩频技术来有效提高每个用户的数据率, 相对 DS-CDMA 有着更高的带宽效率; 利用被动时间反转技术抑制各用户之间的码间干扰和同信道干扰, 复杂度低; 利用扩频码之间的准正交性提高处理增益。湖上实验研究结果表明在浅水 5.27 km 距离且复杂多径干扰条件下, 利用所提方法可实现  $10^{-2}\sim 10^{-4}$  的误码率并实现 6 用户通信, 通信速率可达 39 bit/s。

**关键词:** 水声通信; 循环移位扩频; 多用户通信; 被动时间反转

**中图分类号:** TN929.3

**文献标识码:** A

## Multiuser cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication

HE Cheng-bing, JING Shao-jing, HUA Fei, XI Rui, ZHANG Rui-yu, SHI Wen-tao, ZHANG Qun-fei

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low data rate and high receiver complexity of existing direct sequence spread spectrum code division multiple access (DS-CDMA), a novel code division multiple access (CDMA) using cyclic shift keying (CSK) signaling, namely CSK-CDMA, was proposed for multiuser underwater acoustic communication. The proposed method used the cyclic correlation characteristic of spread spectrum signals with  $M$ -ary modulation to provide a higher data rate than conventional. Passive time reversal technology was employed to suppress inter-code interference between users and the co-channel interference. The quasi-orthogonality of spread spectrum code was used to improve the processing gain. Multiuser communications are demonstrated with lake experimental recorded data under the condition of 5.27 km distance and complex multipath interference. The data rate is 39 bit/s/user for 6 users with bit error rate around  $10^{-2}\sim 10^{-4}$ .

**Key words:** underwater acoustic communication, spread spectrum cyclic shift, multiuser communication, passive time reversal

### 1 引言

随着水声通信技术的发展和世界各国海洋开发步伐的加快, 对水下传感器网络、水下监视系统、水声预警网络的需求愈来愈迫切, 多用户水声通信技术作为水声通信网络的关键技术之一日益受到关注<sup>[1~4]</sup>。水声信道是带宽有限、多径干扰严重的

时、频、空变信道。水声信道有限的通信带宽导致频分复用 (FDMA) 多址接入技术实现的多用户通信效率低, 限制了频分复用技术在水声网络中的应用; 而时分复用 (TDMA) 需要严格的同步, 这在水声传播速度慢、时延起伏大且多途传播严重的水声信道中难以保证。随着研究的深入, 越来越多的国内外研究者认为扩频及码分多址技术 (CDMA,

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61471298, No.61531015); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No.3102016AXXX03); 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 (厦门大学) 基金资助项目 (No.201503)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61471298, No.61531015), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.3102016AXXX03), Fund of Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology (Xiamen University)(No.201503)

code division multiple access) 是水下通信网络多用户通信中最具前景的多址接入方案<sup>[3-8]</sup>。码分多址作为一种扩频多址数字式通信技术, 通过独特的扩频序列建立准正交信道, 具有抗干扰能力强、抗衰落能力强、功率谱密度低、隐蔽性好等优点。

由于水声信道的时变多途效应, 水下多用户通信不仅存在着严重的码间干扰 (ISI), 而且还存在同信道干扰 (CoI)。对信道均衡器来说, 去除时变信道中的 CoI 是一项具有挑战性的工作, 因为均衡器需要跟踪每个用户的信道变化。文献[5]采用 12 个阵元的多通道反馈均衡器在 4 kHz 带宽、10 km 距离内实现 3 用户水声通信, 数据率为 15~240 bit/s, 计算复杂度高, 性能易受均衡器参数选择的影响。文献[9]采用盲自适应多用户检测实现了 7 用户的冰下水声通信。消除复杂多径信道中的残余 CoI 干扰对多用户通信来说仍是一个极具挑战性的工作。

时间反转技术可以为不同空间位置的多个用户提供相互独立的通信渠道, 能够很好地同时克服 ISI 和 CoI, 但是通常需要较多阵元的接收阵, 如文献[10]利用被动时间反转和自适应信道均衡技术, 利用 32 阵元的接收阵实现 3~4 kHz 内的 6 用户通信; 文献[11]利用 16 阵元的接收阵实现 11~19 kHz 内的 3 用户通信。正如文献[12]所述, 其他利用 MIMO-OFDM 技术的多用户水声通信, 当用户数超过 4 个时, 残余 CoI 的干扰抑制较为困难。对于如水下无人航行器 (AUV) 等小尺寸的水下节点, 采用大阵列接收是不现实的。现有情况表明, 母节点 AUV 最多可提供含有 8 个阵元的接收阵列, 另外, 由于节点能量受限, 仅能支持较为简单的接收机算法<sup>[12]</sup>。

在水声通信可用频率范围内, 声波在水中的衰减与频率的平方成正比, 导致水声通信的带宽十分有限。如通常采用的中程通信距离的带宽为 4 kHz, 使直接序列扩频 DS-CDMA 水声通信数据率极低, 仅为几到几十比特, 严重影响了通信系统的实用性。如文献[7]利用 DS-CDMA 技术在 4 kHz 带宽内实现的单用户通信速率仅为 8 bit/s。如何提高扩频水声通信数据率, 是一个迫切需要解决的问题。

循环移位扩频技术利用扩频序列优良的相关特性实现数据率的提升<sup>[13-19]</sup>。本文在课题组前期循环移位扩频水声通信技术的研究基础上<sup>[14-16]</sup>, 进一步提出了循环移位扩频码分多址 (CSK-CDMA) 多用户水声通信技术。首先, 利用空间分集和被动时反技术抑制 CoI, 随后, 利用扩频序列的准正交性消除残余 CoI。所提方法经过了 2 次实验数据的验证, 在系统带宽为 4 kHz 时, 每个用户的通信速率可达到 39 bit/s, 是相同长度扩频序列 DS-CDMA 水声通信单用户速率的 5 倍左右。

## 2 循环移位多用户水声通信原理

系统模型如图 1 所示, 包括  $K$  个发射源和  $M$  个接收元。每个用户分配一个扩频码, 假设这些扩频码具有优良的自相关和互相关特性, 即每个扩频码相互准正交。信号从  $K$  个信号源同时发送进入水声信道, 被  $M$  个接收阵元接收。接收信号首先进行不需要信道估计的被动时反处理, 随后进行空间分集, 最后利用扩频码的准正交性消除残余的 CoI。

如图 1 所示, 用户首先根据待传输的信息, 对分配给它的扩频序列进行循环移位操作, 若操作后

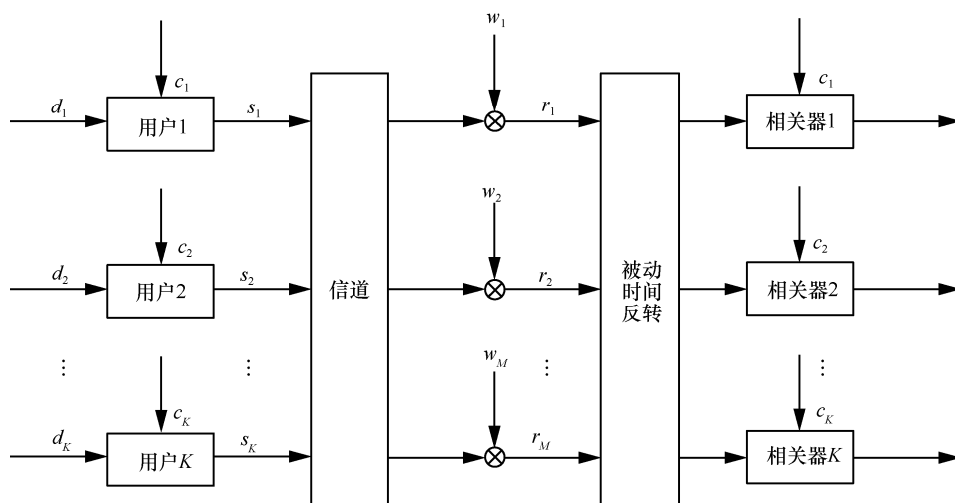


图 1 循环移位扩频多用户水声通信系统模型

存在  $M$  个可能的新序列，那么每个移位波形对应  $\text{lb}M$  bit 信息。这样看来，CSK 是一类  $M$  元软扩频技术，第  $i$  个用户的扩频序列可表示为

$$c_i(t) = \sum_{l=0}^{L_c-1} c_{i,l} \phi(t - lT_c) \quad (1)$$

其中， $c_i = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,L_c}]$  是扩频序列，长度为  $L_c$ ， $T_c$  是码片持续时间， $\phi(t)$  是成形滤波器。根据信源信号  $d_{i,k}$ ，对  $c_i$  进行循环移位操作，则第  $i$  个用户的发射信号

$$s_i(t) = \sum_{k=0}^{N_s} \Gamma(d_{i,k}, c_i(t - kT_s)) \quad (2)$$

其中， $T_s = L_c T_c$  是每个扩频符号的持续时间， $N_s$  是发射的符号数目。 $\Gamma(\bullet)$  是循环移位操作，如对  $c_i$  进行 1 位移位操作，则可表示为

$$\Gamma(1, c_i) = [c_{i,2}, c_{i,3}, \dots, c_{i,L_c}, c_{i,1}] \quad (3)$$

对于 CSK 调制，每个符号可表征  $\text{lb}M$  bit 信号，其数据率可表示为

$$R = \frac{\text{lb}M}{T_s} \quad (4)$$

而对于 DS-CDMA 来说，若采用 BPSK 调制，则其数据率可表示为

$$R = \frac{1}{T_s} \quad (5)$$

由此可见，CSK-CDMA 可显著提高通信速率。

### 3 无需信道估计的被动时反技术

发射信号经过功放并由换能器进行电声转换发射进入水声信道后，第  $j$  个接收阵元收到来自  $K$  个信源的合成信号

$$r_j(t) = \sum_{i=1}^K h_{ij}(t) \otimes s_i(t) + w_j(t) \quad (6)$$

其中， $h_{ij}(t)$  表示第  $i$  个信源到第  $j$  个接收阵元的信道脉冲响应， $\otimes$  表示卷积， $w_j(t)$  表示加性高斯白噪声。导引信号和接收信号的帧结构如图 2 所示，每个用户的导引信号是通过时分正交的，即彼此之间没有干扰，它们经过水声信道后，第  $j$  个接收阵元接收到的

第  $i$  个导引信号可表示为

$$z_j(t) = h_{ij} \otimes c_i(t) + \eta_j(t) \quad (7)$$

其中， $\eta_j(t)$  表示加性高斯白噪声。

如图 1 所示，接收端首先对接收到的多通道信号进行被动时反技术处理，达到空时二维聚焦的效果。假定信道在整个数据帧阶段是时不变的，则导引信号和后续的数据信号具有相同的信道结构。如式(7)所示，接收到的基础波形是基本波形与信道冲击响应的卷积。在本文所提的接收机结构汇总，通过改进的时间反转过程中，将经过信道的基础波形作为循环相关的一个副本，即计算接收端通过计算信号  $z_i(t)$  和导引信号  $c_i(t)$  的互相关函数，估计相关峰值的位置，进行译码。

第  $i$  个用户被动时反处理后的信号可以表示为

$$\begin{aligned} y_i(t) &= \sum_{j=1}^M z_j^*(-t) \otimes r_j(t) \\ &= q_i(t) \otimes c_i^*(-t) \otimes s_i(t) + \\ &\quad \sum_{j=1}^M \sum_{p=1, p \neq i}^K h_{ij}^*(-t) \otimes h_{pj}(t) \otimes c_i^*(-t) \otimes s_p(t) + \\ &\quad \sum_{j=1}^M \eta_j(t) \otimes \sum_{p=1}^K h_{pj}(t) \otimes s_p(t) + \\ &\quad \sum_{j=1}^M h_{ij}^*(-t) \otimes c_i^*(-t) \otimes w_j(t) + \sum_{j=1}^M \eta_j(t) \otimes w_j(t) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $q_i(t) = \sum_{j=1}^M h_{ij}^*(-t) \otimes h_{ij}(t)$  是第  $i$  个用户的  $q$  函数， $\rho_i(t) = c_i^*(-t) \otimes s_i(t)$  为调制后扩频序列和原基本扩频序列的互相关函数，接收机根据  $\rho_i(t)$  的相关峰位置进行解调和译码， $M$  为接收阵元数目，上标\*表示共轭，式(8)中第一项是需要的第  $i$  个用户的信号，第二项是来自其他用户的干扰信号，这一干扰信号受到二次抑制，一方面来自被动时间反转的空时聚焦作用，即  $[q_i(t)] > \left[ \sum_{j=1}^M \sum_{p=1, p \neq i}^K h_{ij}^*(-t) \otimes h_{pj}(t) \right]$ ，另一方面来自扩频码的优良的互相关特性，即  $[\rho_i(t)] > \left[ \sum_{p=1, p \neq i}^K c_i^*(-t) \otimes s_p(t) \right]$ ，其中， $[x]$  表示取函数  $x$  的最大值。假设  $q_i(t)$  和  $\rho_i(t)$  近似为脉冲函数，

同步信号	保护间隔	用户1基本波形	保护间隔	用户2基本波形	保护间隔	...	用户K基本波形	保护间隔	数据
------	------	---------	------	---------	------	-----	---------	------	----

图 2 帧结构设计

则来自其他信源的同信道干扰被极大的抑制，第  $i$  个用户的发射信号可以从  $y_i(t)$  中可靠估计得到，具体的接收机算法流程如图 3 所示。

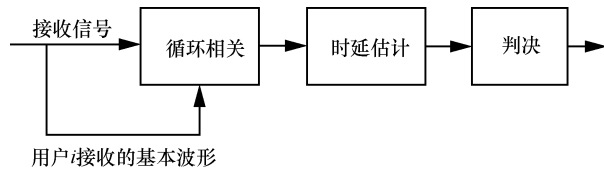


图 3 接收机算法流程

本文所提算法的优点在于：1) 显著提高了多用户通信的数据率；2) 利用被动时反和互相关技术有效地抑制了同信道干扰；3) 不需要进行信道估计，这在低信噪比情况下极为有效。

### 4 系统仿真与性能分析

水声信道的多径传播特性在很大程度上决定了水声通信质量和各种接收处理算法的性能。为了检验第 3 节所提接收机算法在多径水声信道中的性能，采用文献[20]的水声信道模型。在射线声学，声信号沿不同途径的声线到达接收点，总的接收信号是接收点的所有声线传输信号的迭加，基于射线声学的水声信道模型可表示为

$$h(t, \tau_i) = \sum_{i=0}^{L-1} \beta_i(t) \delta(t - \tau_i) \quad (9)$$

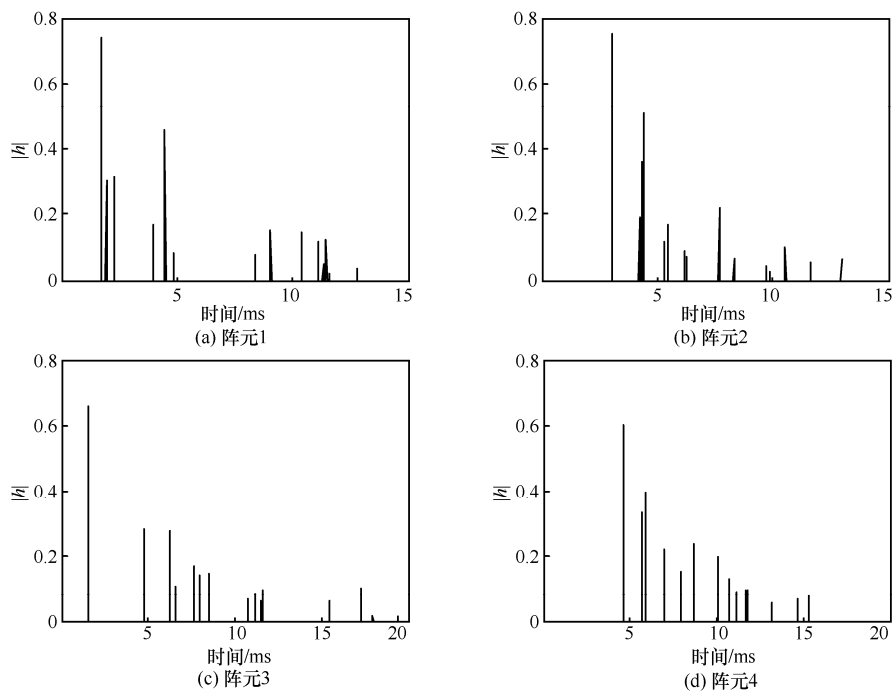


图 4 某一帧时间内单用户到 4 个接收阵元的信道冲激响应

其中， $L$  是多径条数， $\beta_i$  和  $\tau$  分别是多径对应的复增益和传播时延。

系统带宽为 2 kHz，采样频率为 96 kHz，用户数分别为 4 和 6，扩频码长为 256，循环移位阶数为 32，码片速率为 2 kHz，符号速率可近似为 8 Hz，接收换能器阵元数为 8 个。

仿真中，多径条数设定为  $N_p=15$ ，路径之间的时延差基于均值为 1 ms 的指数分布，这样，信道的平均延迟扩展近似 15 ms。每条路径的幅度服从瑞利分布，幅度的平均功率随其延迟呈指数下降，首条路径和最后一条路径幅度强度相差 20 dB。

仿真采用准静止信道，即每一帧长度内仿真中信道保持不变，帧与帧之间的信道是随机独立的，共计仿真 500 帧，每帧中，每个用户的符号数为 40 个 (200 bit)，因此，每帧的时长约为 5 s，在此时间尺度范围内，近似认为信道是时不变的。图 4 给出某一帧内的单个用户和 4 个接收阵元之间的信道响应，每个通道的多径条数均设置为 15 条，各信道不相关，信道扩展时间从 10~25 ms 不等。

图 5 给出基于循环移位扩频的 4 用户通信，在接收阵元个数  $M$  不同时，总误码率随带内接收信噪比的变化曲线。此处，误码率为 4 个用户平均误码率，带内接收信噪比则为 4 用户合成信号单阵元接收信噪比。实际上对单用户来说，信号干扰噪声比更低，特别是来自其他用户的干扰噪声。由图 5 可以得出，随

着阵元数目的增加，误码性能有明显提升，当接收阵元数目增加一倍时，在误码率为  $10^{-4}$  左右，其需要的接收信噪比减少近似 3 dB。这是由于接收阵元数目的增加提高了被动时间反转技术的空时聚焦增益。

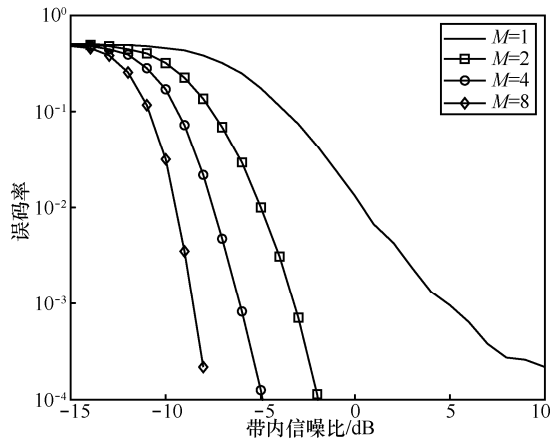


图 5 4 用户通信时误码率随接收阵元数目变化曲线

图 6 给出调制阶数  $M$ -ary 取值不同时对通信系统误码率的影响，其中，扩频码长度为 256，用户数为 4 个。由图 6 可以看出，在相同的带内信噪比条件下，即不增加发射功率，随着调制阶数增加而有效提高了带宽效率的情况下，其误码率没有明显改变。这和 MFSK 调制性能曲线较为类似。实际情况中，由于受到多径时延扩展的影响，调制阶数通常选择在  $\lfloor \frac{L_c}{4} \rfloor$  以内，其中， $\lfloor \cdot \rfloor$  为向下取整运算。

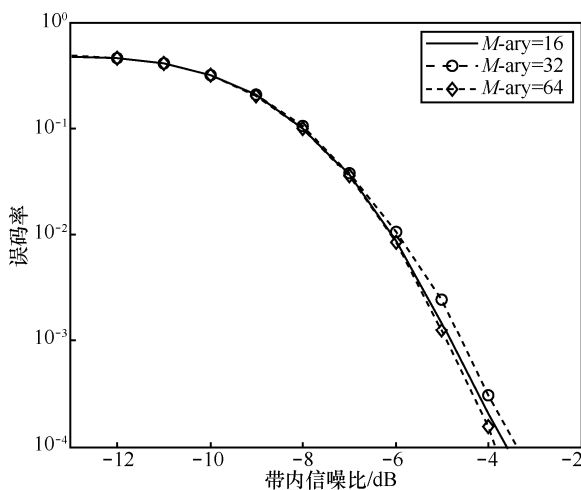


图 6 不同调制阶数 4 用户通信的误码率

在复杂度方面，本文方法通过合理的帧结构设计，在无需信道估计的情况下，实现了信道多径的自

动匹配和能量的聚焦，有效抑制了多径干扰，提高了信噪比，且每个用户仅需要一个相关器即可解码，计算复杂度低。而常规的 DS-CDMA 接收机通常为基于假设检验的多通道判决反馈均衡器，并采用 RLS 自适应算法跟踪信道，复杂度与接收阵元的个数  $M$  和多径扩展的符号长度  $L$  的乘积的平方成正比，其计算复杂度随  $M$  和  $L$  的增加而急剧增加。

### 5 湖上实验研究

上述通过数值仿真分析了循环移位扩频多用户通信误码率性能。下面通过湖上实验研究进一步验证算法的有效性和可靠性。课题组于 2016 年 1 月在丹江口水库进行了湖上多用户水声通信的实验研究。发射和接收换能器皆无指向性，实验区域水深约 40 m，发射换能器布放深度为 10 m，含 8 个阵元的水听器阵布放深度为 20 m。通信实验时，发射船和接收船主辅机停机，两船分别用 GPS 定位，测量出其水平距离约为 5.27 km。

实验装置的带宽为 2 kHz，通信数据的码元宽度为 0.5 ms，CSK 调制的  $M=32$ ，扩频长度为 256 个，分别进行了模拟 4 用户和 6 用户的通信情况。对应的通信性能如表 1 和表 2 所示。每帧符号长度为 200 个，包含 1 000 bit，共计发送 5 次，每用户的数据率为 39 bit/s (若采用 BPSK 调制的 DS-CDMA，则每个用户的数据率仅为 7.8 bit/s)。

图 7(a)为丹江口水库水声通信实验时的信道冲击响应，由线性调频信号测量获得。它反映了信道响应随时间的变化，基本为准静止信道，横轴为信道响应随时间的扩展，纵轴为时间变化，图 7(b)为

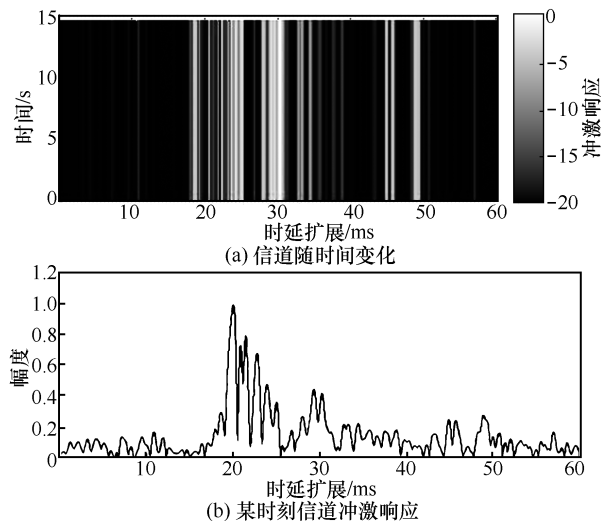


图 7 湖试信道冲激响应

实验过程某时刻的信道响应函数。由图中可见，多径扩展约为 40 ms，相当于 80 个码片宽度，小于一个扩频序列的持续时间。

图 8(a)给出了通道 1 接收到的 2 段通信信号的时域波形，图 8(b)表示的是同步副本信号（线性调频信号）与时域信号的相关输出，可以看到有明显的尖峰，由于同步信号采用了 2 个相同的线性调频信号，因此，每段通信信号前含有 2 个相关峰。6 用户通信信号的接收信噪比略小于 4 用户通信信号，这一点可以从图 8(b)相关峰输出幅度大小看出。每个通道的带内接收信噪比估计值如图 9 所示，4 用户通信时平均信噪比约为 1 dB，6 用户通信时平均信噪比约为 -1.9 dB。表 1 和表 2 分别给出了 4 用户和 6 用户通信单阵元和 8 阵元接收时的误码率。比较图 9、表 1 和表 2 可以发现接收信噪比大小

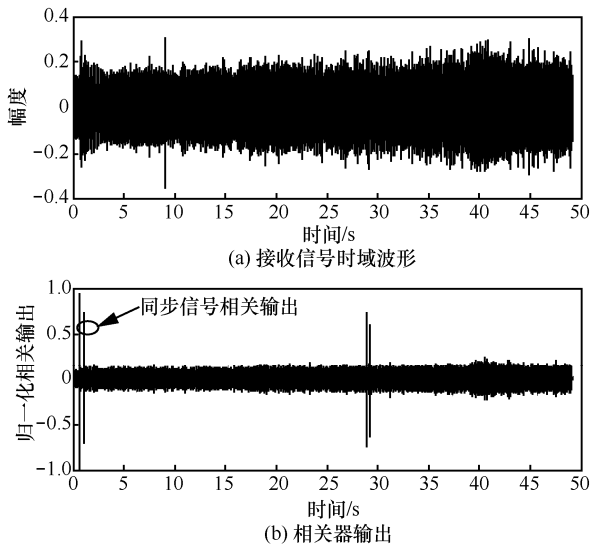


图 8 接收信号时域波形和相关输出

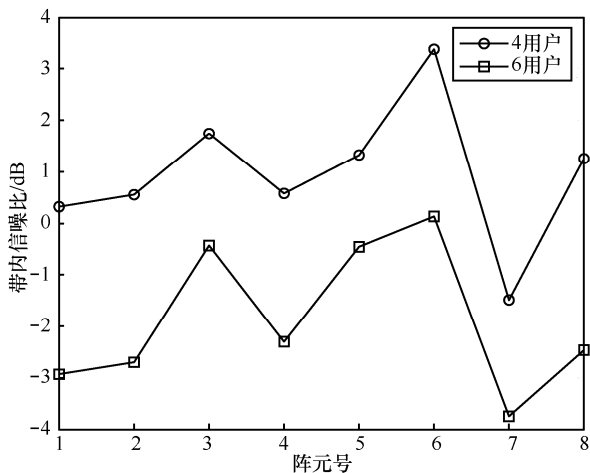


图 9 不同阵元接收信噪比的估计

表 1 长度为 256 时 4 用户的误码率性能

通道号	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4
1	0.083 3	0.070 6	0.041 2	0.022 5
2	0.075 5	0.058 8	0.041 2	0.035 3
3	0.030 4	0.014 7	0.006 9	0.002 9
4	0.030 4	0.008 8	0.019 6	0.007 8
5	0.014 7	0.014 7	0.016 7	0.008 8
6	0.004 9	0.002 9	0	0
7	0.116 7	0.052 9	0.047 1	0.086 3
8	0.021 6	0.002 0	0.007 8	0
8 通道联合	0	0	0	0

表 2 长度为 256 时 6 用户的误码率性能

通道号	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5	用户 6
1	0.267 6	0.294 1	0.310 8	0.329 4	0.289 2	0.273 5
2	0.242 2	0.292 2	0.266 7	0.304 9	0.276 5	0.314 7
3	0.172 5	0.192 2	0.188 2	0.177 5	0.182 4	0.188 2
4	0.207 8	0.180 4	0.214 7	0.185 3	0.222 5	0.203 9
5	0.167 6	0.172 5	0.155 9	0.172 5	0.176 5	0.173 5
6	0.113 7	0.102	0.108 8	0.090 2	0.075 5	0.138 2
7	0.352 9	0.369 6	0.370 6	0.370 6	0.387 3	0.406 9
8	0.190 2	0.196 1	0.184 3	0.183 3	0.177 5	0.212 7
8 通道联合	0.058 8	0.065 7	0.023 5	0.040 2	0.058 8	0.072 5

和单通道接收时的误码率趋势基本一致，即在信噪比最低时（如阵元 7），对应通道的误码率最大，信噪比最高时（如阵元 6），则对应通道的误码率最小，且通过多通道联合处理，误码率显著降低。

从以上实验数据可以看出，循环移位扩频码分多址技术可显著提高多用户通信速率。采用长度为 256 的扩频码，在平均接收信噪比为 1 dB，8 阵元接收时可实现 4 用户的无码率传输；可实现 6 用户的有效传输，纠错前误码率为  $10^{-2}$ 。提高扩频码的长度可以进一步增加用户数目。比较来看，文献[12]中的空分复用 CDMA 技术在采用长度为 255 的扩频码提供 6 用户通信时，需要的输入信噪比在 20~22 dB，而本文方法所需输入信噪比远小于该方法。

## 6 结束语

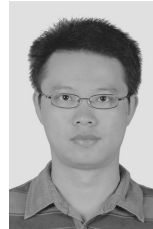
循环移位扩频利用扩频序列优良的自相关特性来提高直接序列扩频通信的数据率，是克服水声扩频通信速率较低的一种有效解决方案。本文深入研究了码分多址多用户水声通信方法，针对目前直

接序列 CDMA 多用户数据率相对较低的情况, 提出基于循环移位扩频的 CDMA 多用户水声通信新方法。该方法可显著提高带宽效率, 并采用无需信道估计的被动时间反转多通道接收技术和扩频序列优良相关特性有效抑制了多用户间的同信道干扰和码间干扰。该算法运算复杂度低, 并可适应较低信噪比环境, 为低复杂度多用户水声通信的实现打下良好的工程基础。最后, 湖上实验结果验证了该方法的可行性及稳健性。与已有公布文献的码分多址多用户水声通信实验结果相比, 在多用户通信距离和带宽利用率等方面都有显著提高。

### 参考文献:

- [1] KILFOYLE D B, BAGGEROER A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000,25(1): 4-27.
- [2] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000,25(1): 72-83.
- [3] FREITAG L, STOJANOVIC M, SINGH S, et al. Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001,26(4):586-593.
- [4] POMPILI D, MELODIA T, AKYILDIZ I F. A CDMA-based medium access control protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1899-1909.
- [5] TSIMENIDIS C C, HINTON O R, ADAMS A E, et al. Underwater acoustic receiver employing direct-sequence spread spectrum and spatial diversity combining for shallow-water multi-access networking[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 594-603.
- [6] KONSTANTAKOS D P, TSIMENIDIS C C, ADAMS A E, et al. Comparison of DS-CDMA and MC-CDMA techniques for dual-dispersive fading acoustic communication networks[J]. IEEE Proc-Commun, 2005, 152(6):1031-1038.
- [7] STOJANOVIC M, FREITAG L. Multichannel detection for wideband underwater acoustic CDMA communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31 (3):685-695.
- [8] CALVO E, STOJANOVIC M. Efficient channel-estimation-based multiuser detection for underwater CDMA systems[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 502-512.
- [9] YING J W, YANG G, HUANG D F, 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): E170.
- [10] SONG H C, KIM J S, HODGKISS W S, KUPERMAN N, et al. High-rate multiuser communications in shallow water[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010,128(5): 2920-2925.
- [11] SONG H C, HODGKISS W S, KUPERMAN W A, et al. Multiuser communications using passive time reversal[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007,32(4):915-926.
- [12] YANG T C. Spatially multiplexed CDMA multiuser underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016,41(1): 217-231.
- [13] DILLARD G M, REUTER M, ZEIDLER J, et al. Cyclic code shift keying: a low probability of intercept communication technique[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 786-798.
- [14] 何成兵, 黄建国, 韩晶, 等. 循环移位扩频水声通信[J]. 物理学报, 2009,58(12):8379-8385.  
HE C B, HUANG J G, HAN J, et al. Cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication[J]. Chin Phys Soc, 2009, 58(12):8379-8385.
- [15] HE C B, ZHANG Q F, HUANG J G. Passive time reversal communication with cyclic shift keying over underwater acoustic channel[J]. Applied Acoustics, 2015 (96): 132-138.
- [16] HE C B, HUANG J G, YAN Z, et al. M-ary CDMA multiuser underwater acoustic communication and its experimental results[J]. Science China Information Sciences, 2011,54(8): 1747-1755.
- [17] 景连友, 何成兵, 黄建国, 等. 基于被动时间反转的差分循环移位扩频水声通信[J]. 上海交通大学学报, 2014,48(10): 1378-1383.  
JING L Y, HE C B, HUANG J G, et al. Differential cyclic shift keying spread-spectrum underwater acoustic communication based on passive time-reversal[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(10): 1378-1383.
- [18] 于洋, 周锋, 乔钢. 正交码元移位键控扩频水声通信[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064302.  
YU Y, ZHOU F, QIAO G. Orthogonal code shift keying spread spectrum underwater acoustic communication[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 064302.
- [19] 杜鹏宇, 殷敬伟, 周焕玲. 基于时反镜能量检测法的循环移位扩频水声通信[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 014302.  
DU P Y, YIN J W, ZHOU H L, et al. Cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication using time reversal energy detector[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 014302.
- [20] WANG L, ZHOU S L, YANG T C, et al. Performance comparison of Doppler scale estimation methods for underwater acoustic OFDM[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012:1-12.

### 作者简介:



何成兵 (1981-), 男, 安徽巢湖人, 博士, 西北工业大学副教授, 主要研究方向为水声通信。

荆少晶 (1992-), 女, 山西永济人, 西北工业大学硕士生, 主要研究方向为多用户水声通信。

花飞 (1989-), 男, 安徽合肥人, 西北工业大学博士生, 主要研究方向为水声信号处理。

席瑞 (1996-), 男, 安徽滁州人, 西北工业大学硕士生, 主要研究方向为水声通信。

张瑞玉 (1993-), 女, 河南周口人, 西北工业大学硕士生, 主要研究方向为水声通信。

史文涛 (1985-), 男, 陕西扶风人, 博士, 西北工业大学副教授, 主要研究方向为水声信号处理。

张群飞 (1968-), 男, 浙江东阳人, 博士, 西北工业大学教授, 主要研究方向为水声信号处理和水声通信。