

# 循环移位扩频水声通信\*

何成兵<sup>†</sup> 黄建国 韩 晶 张群飞

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2008 年 8 月 28 日收到, 2009 年 3 月 20 日收到修改稿)

针对常规直接序列扩频水声通信数据传输速率低及  $M$  元扩频水声通信接收机复杂度高的问题, 基于扩频序列优良的相关特性, 提出循环移位扩频水声通信方法. 在发射端, 根据输入信息对基本波形进行循环移位编码; 在接收端, 利用快速相关技术进行时延估计及译码. 进行了中远程湖上实验研究, 在 15 km 距离 2 kHz 带宽内, 总数据传输速率可达 438 bit/s, 误码率为  $10^{-2}$ — $10^{-5}$ . 实验结果表明该方法具有带宽利用率高、复杂度低的特点, 适用于中远程及多用户水声通信.

关键词: 水声通信, 扩频, 循环移位, 时延估计

PACC: 4330, 0545

## 1. 引 言

随着人类对海洋资源开发的迅速发展, 世界各国对水下信息传输技术的要求越来越迫切. 水声通信是目前实现水下信息中远程传输的主要形式, 是涵盖海洋技术与信息技术国家急需的高新技术之一.

水声信道是一带宽有限、多径干扰严重的时、频、空变信道<sup>[1-3]</sup>. 水声信道的复杂性及多变性严重限制了水声通信性能. 由于水声信道的复杂多变性, 多种调制和解调技术均有一定的实用性, 为此, 美国海军空间与海洋作战系统研究中心进行了多次 SignalEx 海上实验. SignalEx 实验目的是为了比较各种水声通信调制技术在不同水声信道环境下的统计性能, 以优化系统参数. 其调制方式主要分为近程高速水声通信和远程低速水声通信. 高速水声通信主要采用相位相干技术<sup>[2]</sup>或正交多载波技术<sup>[3]</sup>; 低速水声通信主要采用频移键控<sup>[1]</sup>、脉冲位置调制和扩频技术<sup>[1, 4-9]</sup>.

近年来, 扩频水声通信技术受到较大关注. 一方面原因是在远程 (大于 10 km) 水声通信中, 扩频通信具有重要的应用价值. 它保密性好, 抗多径干扰和

信道衰落能力强, 可在低信噪比条件下工作. 另一方面原因是当前水声通信已经发展到开始建立水声通信网络的阶段<sup>[9-13]</sup>, 如美国可用于自主式分布传感器系统<sup>[9]</sup>的 Seaweb 网络、欧盟用于近海环境监测的声通信网等<sup>[13]</sup>. 其中, 多用户水声通信是实现水声通信网络的关键技术之一<sup>[9-13]</sup>. 水声信道的有限带宽限制了频分复用技术在水声网络中的应用, 而时分复用需要严格的同步技术, 目前普遍认为扩频及码分多址技术 (CDMA) 是浅海水声通信网络最有应用前景的多址接入方案<sup>[10]</sup>. 现已提出多种用于水声通信网络的直接序列码分多址 (DS-CDMA) 方案及相应的信号处理技术<sup>[10-13]</sup>, 如文献 [10] 利用 Rake 接收机和空间分集均衡技术, 文献 [11] 采用 DS-CDMA, Walsh 码及 Rake 接收机, 在 4 kHz 带宽和 10 km 以内实现三用户水声通信, 数据传输速率为 15—240 bit/s. 文献 [12] 在发射端将四通道 DS-CDMA 水声通信信号叠加成混合信号, 利用点对点传输模拟多用户水声通信, 采用多通道联合波束形成及高级均衡技术, 在 20 kHz 带宽和 2.5 km 范围内实现四用户水声通信. 另外, 随着水声传感器网络技术的发展, 现急需低功耗、长值守、隐蔽性好的水声通信技术. 由此可见, 扩频水声通信技术具有重要的研究意义.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60572098) 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070699020) 西北工业大学博士论文创新基金 (批准号: CX200602) 和西北工业大学基础研究基金 (批准号: NPU-FFR-W018102) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: hcb.nwpu@gmail.com

然而,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.中远程水声通信的带宽往往只有几千赫兹,甚至几百赫兹,以至常规直接序列扩频水声通信数据传输速率极低,仅几比特到几十比特,严重影响了通信系统的实用性<sup>[4-6]</sup>.

如何提高扩频水声通信数据传输速率,是一个迫切需要解决的问题<sup>[4-8]</sup>.在诸如  $M$  元混沌调频<sup>[5]</sup>、正交  $M$  元直接序列扩频<sup>[6]</sup>、 $M$  元扩频时域叠加和多径联合利用新方法<sup>[7]</sup>及  $M$  元混沌扩频和多通道斑图时延差编码水声通信<sup>[8]</sup>这类接收机中需要拷贝相关器组进行译码,当  $M$  较大时,其计算量显著增加.为了解决数据传输速率和计算量的矛盾,实现低功耗、长值守等目的,本文提出循环移位(cyclic shift keying, CSK)扩频<sup>[4]</sup>水声通信新方法,接收端采用被动时间反转均衡技术联合利用多径信息<sup>[15]</sup>.湖上初步实验研究验证了双码循环移位扩频水声通信的可行性及有效性.

## 2. 循环移位扩频水声通信原理

### 2.1. 扩频序列的循环移位特性

离散扩频序列,如最大长度移位序列、Gold 序列、Kasami 序列及混沌序列均具有良好的循环相关特性.设扩频最大长度移位序列为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ ,  $N$  为序列长度,则扩频序列的自相

关函数为

$$R(j) = \begin{cases} 1 & (j = 0), \\ \frac{1}{N} & (j = 1, 2, \dots, N-1), \end{cases} \quad (1)$$

其中  $R(j)$  定义为

$$R(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_{i+j}. \quad (2)$$

(2) 式中,  $x$  的下标按模  $N$  运算,即有  $x_{N+k} \equiv x_k$ . 令  $y$  为  $x$  的循环移位序列,表示为

$$y = \begin{cases} x_{i+k} & (1 \leq i \leq N-k), \\ x_{i+k-N} & (N-k+1 \leq i \leq N), \end{cases} \quad (3)$$

则  $y$  与  $x$  的互相关函数为

$$\begin{aligned} \tilde{R}(m) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y x_{i+m} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} x_{i+k} x_{i+m} + \frac{1}{N} \sum_{i=N-k+1}^N x_{i+k-N} x_{i+m}. \end{aligned} \quad (4)$$

由于  $x$  的下标按模  $N$  运算,则  $x_{i+k-N} \equiv x_{i+k}$ , (4) 式变为

$$\tilde{R}(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i+k} x_{i+m}. \quad (5)$$

比较 (1) (2) 和 (5) 式可得

$$\tilde{R}(m) = \begin{cases} 1 & (m = k), \\ \frac{1}{N} & (m \neq k). \end{cases} \quad (6)$$

根据 (6) 式可知,循环移位序列和原序列的互相关函数的峰值位置由循环移位大小确定.利用不同的循环移位可以实现多元调制,图 1 给出了长度为 63 的

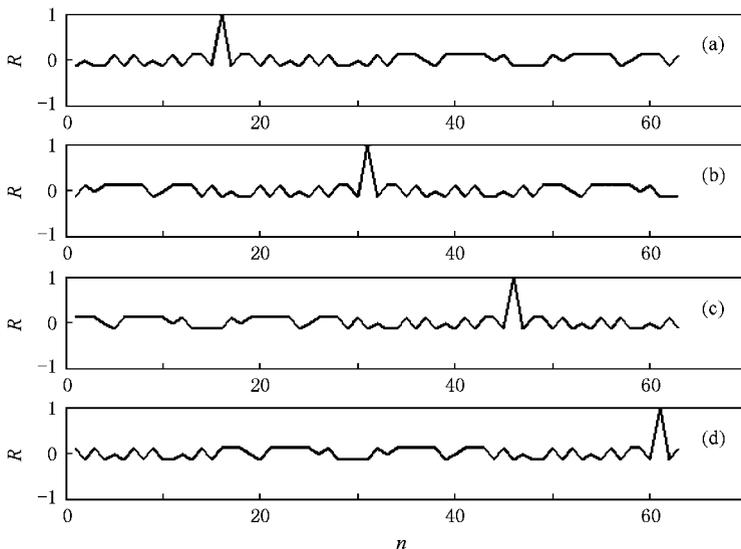


图 1 Kasami 序列和其循环移位序列归一化相关特性 循环移位长度分别为(a)6 (b)11 (c)16 (d)61

Kasami 序列  $x$  和其循环移位序列  $y$  相关特性,其循环移位长度  $n$  分别为 16, 31, 46 和 61 个码片宽度.

## 2.2. 循环移位编码

循环移位编码根据输入的信息,对基本波形  $f(t)$  进行循环移位获得移位波形  $g(t)$ ,其关系如下:

$$g_k(t) = \begin{cases} f(t + k\Delta\tau) & (0 \leq t \leq T - k\Delta\tau), \\ f(t - T + k\Delta\tau) & (T - k\Delta\tau < t \leq T), \end{cases} \quad (7)$$

其中  $T$  为波形持续时间,  $\Delta\tau$  为移位步长,  $k$  由输入信息确定. 如果利用可以分辨的  $M$  个不同循环移位序列表示信息, 则每个移位波形  $g(t)$  可表示  $\log_2 M$  个比特信息.

基本波形  $f(t)$  和其移位波形  $g(t)$  应该具有良好的循环相关特性. 因此, 基本波形通常由具有良好的循环相关特性的离散扩频序列进行相位调制或频率调制获得. 基于扩频序列相位调制的循环移位键控基本波形可以表示为

$$f(t) = \sum_{i=1}^N x_i \cos(2\pi f_c t) p(t - iT_c), \quad (8)$$

其中  $T_c$  为扩频码片持续时间,  $N$  是扩频序列长度, 每个码片采用二进制相位调制,  $p(t)$  是发射端脉冲成形滤波函数. 根据输入信息, 利用(7)式产生移位波形  $g(t)$ , 其移位步长  $\Delta\tau$  可以为一个码片长度或

多个码片长度, 甚至为分数个码片长度, 这取决于时延估计的精度. 接收信号可表示为

$$r(t) = g(t) * h(t) + n(t), \quad (9)$$

其中  $*$  表示卷积,  $h(t)$  为水声信道,  $n(t)$  为加性高斯白噪声. 接收端通过计算接收基带信号  $r(t)$  和基本波形相关技术, 估计相关峰值的位置, 进而进行译码.

$$y(t) = |F^{-1}(F^*(f_b(t)) \times F(r_b(t)))|, \\ \tau = \arg \max_t (y(t)),$$

$$k = \tau / \Delta\tau, \quad (10)$$

其中  $f_b(t)$  为  $f(t)$  的基带波形, 储存在接收机存储器中, 而  $r_b(t)$  为  $r(t)$  的基带波形, 通过正交解调获得.  $F(\cdot)$  和  $F^{-1}(\cdot)$  为相应的离散 Fourier 变换与逆变换. 利用分数间隔采样, 进行循环相关处理, 可以提高时延估计的精度, 但计算量有适当增加.

并行组合扩频方法<sup>[5-7]</sup>是在一组扩频序列中选择多个扩频序列并行传输, 以提高数据传输速率. 借鉴并行组合扩频思想, 利用多个扩频码各自进行循环移位调制, 叠加后形成复合发送信号

$$s(t) = \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^{\infty} g_i(t - jT). \quad (11)$$

湖上实验表明, 在远距离通信时扩频序列数  $Q$  通常取 1—4, 且与扩频序列的长度有关. 例如, 利用两个扩频码分别作为同相和正交两路基本波形, 进行循环移位扩频, 其系统框图如图 2 所示.

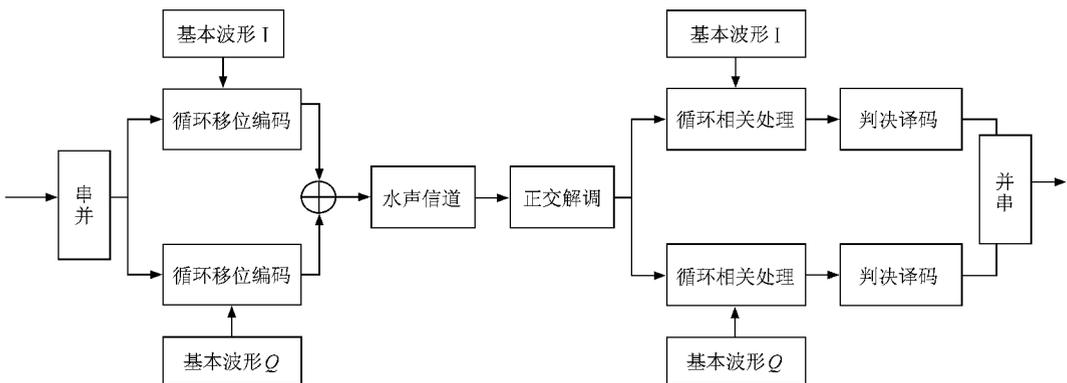


图2 多码循环移位扩频水声通信系统

水声信道是一复杂时变多径信道, 已有的水声通信系统通常采用抗多径干扰技术, 如保护间隔及自适应信道均衡技术. 水声通信系统应该具有匹配信道及利用多径的能力, 以提高水声通信系统在不同信道条件下的性能. 常规的扩频水声通信采用

Rake 接收机技术联合利用多径信息. Rake 接收机需要多路相关器, 为了简化接收机, 对于 CSK 扩频水声通信, 我们采用被动时间反转均衡技术<sup>[15]</sup>. 被动时间反转技术可表示为

$$\hat{r}(t) = \tilde{h}(-t) \otimes r_b(t), \quad (12)$$

其中  $\tilde{h}(t)$  为估计的信道响应函数. 被动时间反转即频域相位共轭技术<sup>[16,17]</sup>, 先是在光学方面得到了应用, 随后推广到海洋声学领域<sup>[15]</sup>. 此时, 接收机采用频域相位共轭方法进行多径利用<sup>[7]</sup>,

$$y(t) = |F^{-1}(F^*(f_b(t)) \times F^*(\tilde{h}(t)) \times F(r_b(t)))|. \quad (13)$$

### 3. 系统性能分析

#### 3.1. 数据传输速率比较

设共有  $M$  个时隙用于编码, 扩频序列长度为  $N$ , 码片持续时间为  $T$ , 扩频序列数为  $Q$ . 多码循环移位扩频水声通信系统为

$$R_s = \frac{Q \log M}{NT}. \quad (14)$$

与常规直接序列扩频水声通信比较可知, 该方法有效地提高了. 当  $Q=1$  时, 多码循环移位扩频水声通信变为常规循环移位扩频水声通信. 对于  $M$  的选择, 通常取  $M=2^k$ , 其中  $k$  为整数. 一方面, 按照文献 [8] 中的时延取值, 可通过增加  $M$  值提高. 斑图时延编码<sup>[8]</sup>需要利用额外的空隙表示时延信息, 而循环移位扩频利用特殊信号的相关特性进行循环移位编码, 接收端估计循环移位值进行解码, 没有引入额外的空隙, 提高了带宽利用率<sup>[9]</sup>.

#### 3.2. 计算量比较

对于水声传感器网络等应用领域, 需要接收机具有低功耗、长值守等能力. 常规  $M$  元扩频技术, 其接收端需要  $M$  个相关器, 当  $M$  较大时 (如  $M=128$ ) 其计算量较大, 不易实时处理. 而文献 [6—8] 利用  $M$  个相关处理器估计时延值进行译码. 当采用  $M$  元多通道方法时, 相关器个数变为  $MQ$  个 ( $Q$  为扩频码数目). 在相同通道下, 循环移位扩频技术仅采用  $Q$  个相关器, 由于  $Q$  一般取 1—4, 因而接收机计算量低.

循环移位扩频技术还有其他优点. 它可通过改变  $M$  值, 实现自适应扩频调制. 这与常规的通过改变扩频序列长度 (即改变扩频序列) 来改变数据传输速率的方法相比更容易实现. 循环移位扩频技术还具有一定的保密性. 信息波形是以基本波形为参考进行循环移位. 接收端必须在知道基本波形的情况下才能正确进行时延估计而译码, 对于未授权用

户在未知基本波形情况下, 则无法正确译码.

## 4. 实验结果及分析

2005 年初, 我们进行了中、远程水声通信实验研究. 实验区域水深 40—100 m, 不存在明显的温跃层, 声速呈现微弱负梯度. 接收船抛锚固定于湖面上, 而发射船随水流呈自由漂流状态, 速度约为 0.5 m/s, 通信距离为 5 和 15 km, 通信距离和水深的比值远大于 100, 属于浅水信道. 收发水听器 (无指向性) 分别置于水下 22 m 和 6 m, 声源级约为 187 dB. 系统带宽为 2 kHz, 扩频码片宽度为 0.5 ms. 采用全数字化接收机, 采样频率为 32 kHz. 利用线性调频脉冲信号进行信道估计, 脉冲信号宽度为 1 s, 估计出的时变信道脉冲响应如图 3 所示, 其中图 3(a) 为 5 km 信道时变响应图, 图 3(b) 为 15 km 信道时变响应图, 信道测量的时间间隔约为 5 s, 输出幅度已归一化. 整个通信持续时间内多径个数与多径位置基本保持稳定, 但是受到信道内时变因素影响, 信道结构中各多径的相对幅度随时间变化. 如图 3 所示, 最大多径时延扩展约为 6 ms.

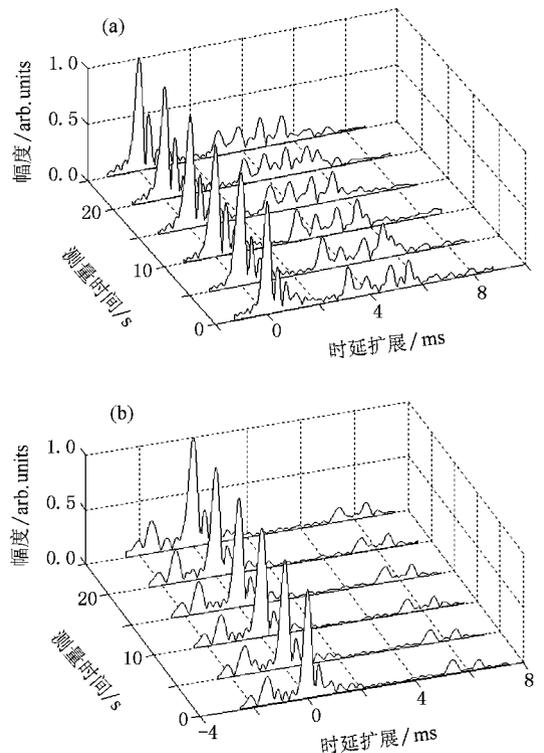


图 3 时变信道脉冲响应 (a) 5 km 实测信道 (b) 15 km 实测信道

#### 4.1. 单码实验结果分析

当使用单码时,扩频序列长度为 32,移位步长为半个码片长度,即  $M = 64$ ,每个符号代表 6 bit 信息,符号持续时间为 16 ms,数据传输速率达 375 bit/s. 5 和 15 km 单码实验结果分析如图 4 所示. 为了更加直观显示接收机性能,模拟通信中常用眼图给出相关输出波形叠加时的情况,每次均以相关输出波形峰值对应的位置为零点. 如 4(a) 和 (c) 所示,相关输出波形重叠程度越高,表示其接收性能越好.

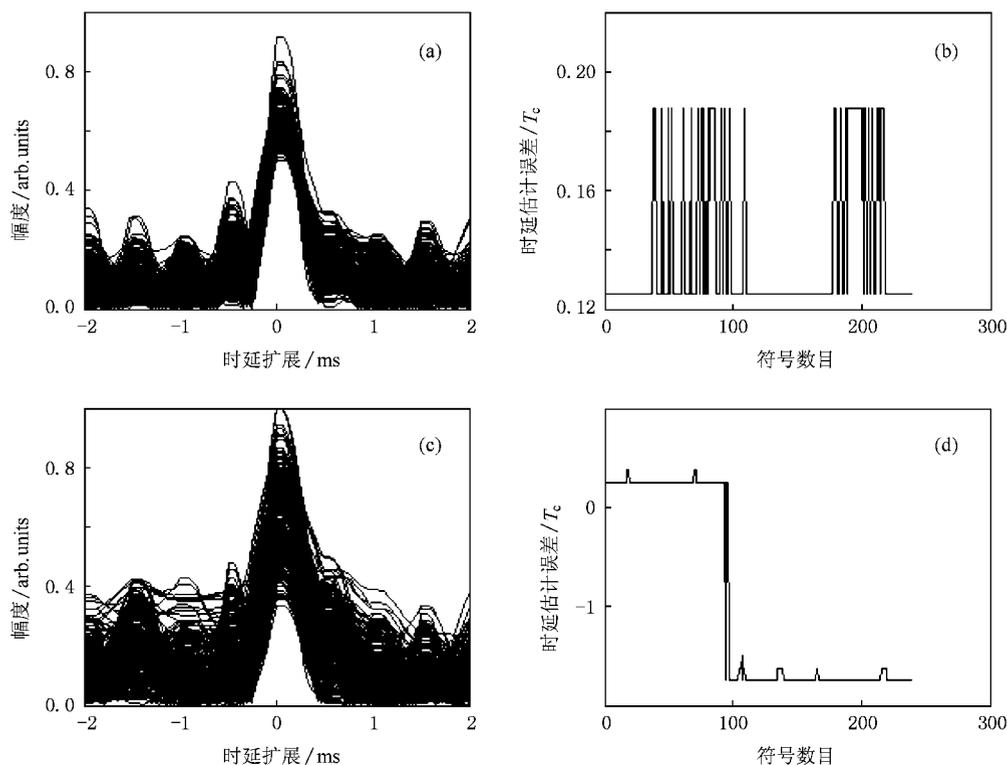


图 4 单码 CSK 湖上实验结果分析 (a)(b) 为 5 km 实验结果 (c)(d) 为 15 km 实验结果

#### 4.2. 两码实验结果分析

当使用两码时,每路扩频序列长度均为 64,移位步长为半个码片长度,即  $M = 128$ ,每个符号代表 7 bit 信息,持续时间为 32 ms,每个通道的数据传输速率达 219 bit/s,两码循环移位扩频水声通信数据传输速率达 438 bit/s. 这里仅给出 5 km 两码 CSK 的实验结果分析(图 5),接收信噪比为 7.1 dB, Doppler 频移估计值为  $-1.3$  Hz,每个通道时延在 0.2 个码片长度内变化.

总之,比较分析时延估计误差随符号数目变化关系,可得如下结果 (1) 在单码水声通信中,随着通

这主要取决于信噪比和信道条件. 由图 4 可以看出,5 km 的相关输出波形重叠效果优于 10 km. 这是由于 5 km 时接收信噪比约为 7.1 dB, Doppler 频移估计值为  $-1.3$  Hz, 15 km 时接收信噪比约为 5.5 dB, Doppler 频移估计值为  $-2.2$  Hz. 循环移位大小需根据相关器时延估计结果,图 4(b) 和 (d) 中给出时延估计误差与码片宽度之比随符号数变化的结果. 从图 4(b) 和 (d) 可以看出,通信距离为 5 km 时,总的时延在 0.25 个码片以内变化;通信距离为 15 km 时,总的时延在 1 个码片以内变化.

信距离和多普勒频移的增加及信噪比的降低,时延波动增大.(2) 在多码水声通信中,随扩频码数目的增加,时延波动逐步增加.(3) 时延波动存在慢变和跳变两种情况. 如图 4 和图 5 中的时延误差变化图所示,均存在一个固定的时延偏移. 可以采用参考符号的方法消除这类固定或慢变时延波动,提高系统性能.(4) 根据时延估计差的变化性质,在不同信道条件下选择不同时隙长度进行调制,实现自适应调制,以充分提高系统性能和带宽利用率.

表 1 给出了距离为 5 和 15 km 下单码、两码实验参数及结果. 随着距离增加、扩频码数目或通道数增加,系统误码率随之增加. 基于 CSK 湖上实验结

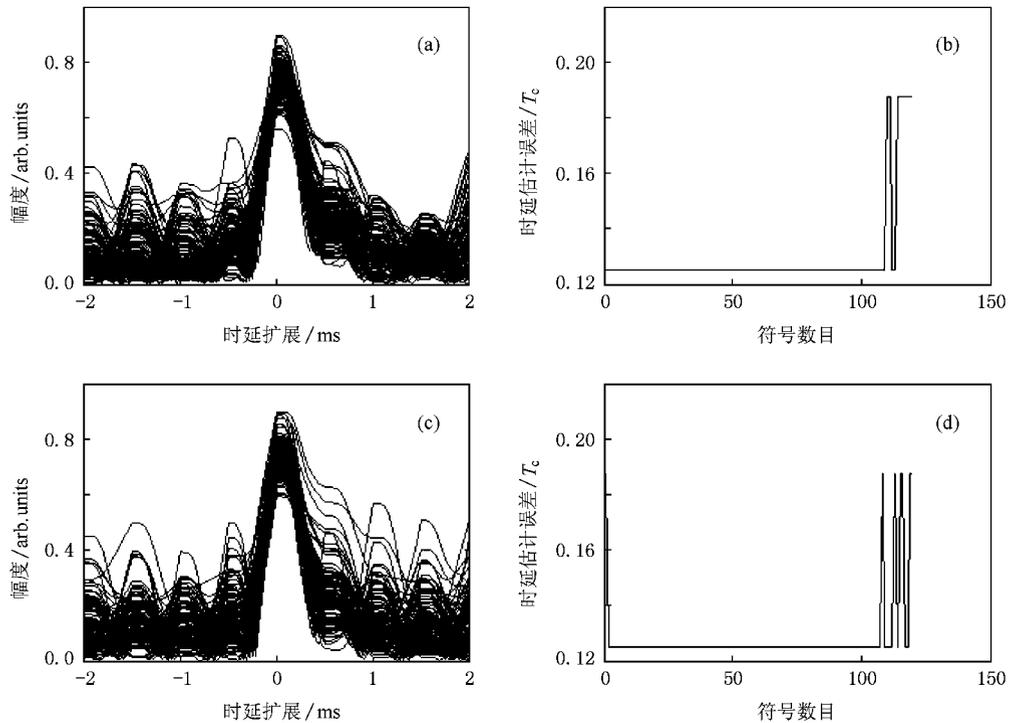


图5 5 km 双码 CSK 湖上实验结果分析 (a)(b)为通道 1 实验结果 (c)(d)为通道 2 实验结果

果表明,在 15 km 距离和 2 kHz 带宽内,单码 CSK 数据传输速率可达 375 bit/s,误码率为  $1.4 \times 10^{-3}$ ;双码 CSK 数据传输速率达 438 bit/s,误码率为  $3 \times 10^{-3}$ 。

表 1 循环移位扩频水声通信湖上实验结果

距离 /km	码数	时隙数	码长 /bit	数据传输速率/bit·s <sup>-1</sup>	信噪比 /dB	Doppler 频移/Hz	误码率 /%
5	1	64	32	375	7.1	-1.3	0.00
5	2	128	64	438	7.1	-1.3	0.00
15	1	64	32	375	5.5	-2.1	0.14
15	2	128	64	438	5.5	-2.1	0.30

## 5. 结 论

本文提出一种多码循环移位扩频中远程水声通信新方法,提高了常规直接扩频水声通信,降低了  $M$  元扩频水声通信计算量。这为低功耗、长值守、带宽有效的中远程扩频水声通信、多用户水声通信及水声传感器网络的实现打下良好的工程基础。中远程湖上实验结果验证了该方法的可行性及稳健性。与已有文献的水声扩频通信实验结果相比,在通信距离、带宽利用率及稳健性方面都有所提高。

在今后的工作中,为了提高保密性和稳定性,将在扩频码的选取,如混沌序列<sup>[18]</sup>、混沌量化伪随机序列<sup>[19,20]</sup>、纠错编码以及 Doppler 频移估计与补偿和多用户检测技术等方面做进一步深入的研究。

[1] Kilfoyle D, Baggeroer A 2000 *IEEE J. Ocean. Eng.* **25** 4  
 [2] Stojanovic M, Catipovic J A, Proakis J G 1994 *IEEE J. Ocean. Eng.* **19** 100  
 [3] Kim B C, Lu I T 2000 *Proc. IEEE Oceans* **1** 1251  
 [4] Freitag L, Stojanovic M, Singh S, Johnson M 2001 *IEEE J. Ocean. Eng.* **26** 586  
 [5] Wang H B, Wu L X 2004 *Acta Acust.* **29** 161 (in Chinese) [王海斌、吴立新 2004 声学学报 **29** 161]

[6] Han J, Huang J G, Zhang Q F, Shen X H, He C B 2006 *J. Northwestern Polytech. Univ.* **24** 463 (in Chinese) [韩晶、黄建国、张群飞、申晓红、何成兵 2006 西北工业大学学报 **24** 463]  
 [7] He C B, Huang J G, Zhang Q F, Yan Z H 2008 *J. China Ordnance* **1** 26  
 [8] Yin J W, Hui J Y, Wang Y L, Hui J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5915 (in Chinese) [殷敬伟、惠俊英、王逸林、惠娟 2007 物理学报 **56** 5915]

- [ 9 ] Sozer E M , Stojanovic M , Proakis J G 2000 *IEEE J. Ocean. Eng.* **25** 72
- [ 10 ] Tsimenidis C C , Hinton O R , Adams A E , Sharif B S 2001 *IEEE J. Ocean. Eng.* **26** 594
- [ 11 ] Lappierre G , Beuzelin N , Labat J , Trubuil J , Goalic A , Saoudi S , Ayela G , Coince P , Coatelan S 2005 *Proc. IEEE Europe Oceans 1* 425 Brest , France 20—23 June 2005
- [ 12 ] Stojanovic M , Freitag L 2006 *IEEE J. Ocean. Eng.* **31** 685
- [ 13 ] Acar G , Adams A E 2006 *IEE Proc. Radar Sonar Navig.* **153** 365
- [ 14 ] Dillard G M , Reuter M , Zeidler J , Zeidler B 2003 *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.* **39** 786
- [ 15 ] Yang T C 2004 *IEEE J. Ocean. Eng.* **29** 472
- [ 16 ] Bu Y , Wang X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4747 ( in Chinese ) [ 步扬、王向朝 2005 物理学报 **54** 4747 ]
- [ 17 ] Yin J W , Hui J Y , Guo L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1753 ( in Chinese ) [ 殷敬伟、惠俊英、郭龙祥 2008 物理学报 **57** 1753 ]
- [ 18 ] Yu Z B , Feng J C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1409 ( in Chinese ) [ 余振标、冯久超 2008 物理学报 **57** 1409 ]
- [ 19 ] Sun K H , Tan G Q , Sheng L Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3359 ( in Chinese ) [ 孙克辉、谈国强、盛利元 2008 物理学报 **57** 3359 ]
- [ 20 ] Sheng L Y , Xiao Y Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4007 ( in Chinese ) [ 盛利元、肖燕予 2008 物理学报 **57** 4007 ]

## Cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication \*

He Cheng-Bing<sup>†</sup> Huang Jian-Guo Han Jing Zhang Qun-Fei

( College of Marine Engineering , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China )

( Received 28 August 2008 ; revised manuscript received 20 March 2009 )

### Abstract

Aimed at solving the problem of low data rate of direct sequence spread spectrum underwater acoustic communication and that of complexity of the receivers of  $M$ -ary spread spectrum underwater acoustic communication , cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication is proposed based on the good characteristic of spread sequences. At the transmitter , base waveform is cyclically shifted according to the input information. At the receiver , only one correlator is used to estimate the time delay and decode. Multi-code spread spectrum based on cyclic shift is presented. Lake experiments at both middle and long range were conducted for the proposed methods. Single and two code cyclic shift keying underwater acoustic communication were realized in the range of 15 km and the bandwidth of 2 kHz. The data rate was 438 bit/s with bit error ratio around  $10^{-2}$ — $10^{-5}$ . The result demonstrated the bandwidth efficiency and low complexity of the proposed methods and the applicability for long range underwater acoustic communication and multi-user underwater acoustic communication network.

**Keywords** : underwater acoustic communication , spread spectrum , cyclic shift , time delay estimation

**PACC** : 4330 , 0545

\* Project supported by the National Natural Science Foundation ( Grant No. 60572098 ) , the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education , China ( Grant No. 20070699020 ) , the Doctorate Dissertation Foundation of Northwestern Polytechnical University , China ( Grant No. CX200602 ) and the Foundation for Fundamental Research of Northwestern Polytechnical University , China ( Grant No. NPU-FFR-W018102 ).

<sup>†</sup> E-mail : hcb.nwpu@gmail.com