

RA 码在水声 OFDM 通信系统中的应用研究

孙海信¹, 王菊香¹, 程恩¹, 苏为¹, 蒯小燕¹, 郭瑜晖¹, 徐小卡²

(1. 厦门大学信息科学与技术学院, 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建厦门 361005;

2. 河南师范大学物理与电子工程学院, 河南新乡 453007)

摘要: 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术由于具有频谱利用率高、抗多径能力强等优点, 成为当前水声通信的研究重点和热点, 但较高的峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)严重影响了水声 OFDM 通信系统的性能。采用重复累积码(Repeat Accumulate, RA)作为信道编码方案, 并用线性反馈移位寄存器(Linear Feedback Shift Registers, LFSR)代替原 RA 码结构中的累加器, 再通过选择映射>Selective Mapping, SLM)方法降低系统的峰均功率比。计算机仿真和水池实验结果表明, 采用改进结构的 RA 码结合 SLM 技术能有效降低水声 OFDM 系统的 PAPR, 提高系统的性能, 具有很好的应用前景。

关键词: OFDM; RA 码; 峰均功率比; 水声通信

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-02-0136-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.013

Applied research on RA codes in underwater acoustic OFDM communication system

SUN Hai-xin¹, WANG Ju-xiang¹, CHENG En¹, SU Wei¹, KUAI Xiao-yan¹,
GUO Yu-hui¹, XU Xiao-ka²

(1. College of Information Science and Technology, Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. College of Physics and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, He'nan, China)

Abstract: Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology has become the research focus and hotspot of underwater acoustic communications owing to its advantages such as high spectrum efficiency and robustness to multipath fading, but it possesses high peak-to-average power ratio (PAPR) which severely degrades the performance of Underwater Acoustic OFDM Communication System. In this paper, repeat accumulate (RA) code is adopted as the channel coding scheme, and linear feedback shift registers (LFSR) is used to replace the accumulator of original RA code structure, then selective mapping (SLM) method is also adopted to reduce the PAPR of system. Computer simulation and experimental results show that modified RA code and SLM can effectively reduce the PAPR and improve the performance of underwater acoustic OFDM communication system, which have a very good application prospect.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Repeat Accumulate Code(RA); Peak-to-Average Power Ratio (PAPR); underwater acoustic communication

0 引言

水声信道具有衰减严重、频散效应和多径效应等特性, 是自然界中最复杂的无线通信信道^[1]。在这样复杂多变的信道环境下实现高速可靠传输是最富有挑战性的任务。近年来, 由于 OFDM 技术能够在时变信道中实现高速传输而被广泛应用于水

声通信系统中。OFDM 技术将整个可利用的信道分成若干个相互正交的子信道, 由于子载波间有部分重叠, 频谱利用率比频分多址(FDMA)技术高, 另外每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽, 可以消除码间干扰(ISI)。然而, OFDM 技术应用于水声通信仍然面临着几个挑战, 首先, 由于没有利用信道固有的多径, 未编码的 OFDM 通信系统在双选择性扩展水声信道^[2]中的性能较低; 其次, OFDM 系统具有较高的 PAPR, 使得发送端对功率放大器的线性要求很高。为了解决第一个问题, 可以采用信道编码提供一定的编码增益来提高 OFDM 系统的性能^[3]。目前, 有一些比较成熟的信道编码方案已经应用于水声通信系统中, 文献[4]将网格编码结

收稿日期: 2013-01-23; 修回日期: 2013-03-15

基金项目: 研究基金访问学者项目 (2011631504); 中央高校基础研究基金项目(201112G020 和 201212G012); 国家自然科学基金项目(41176032)

作者简介: 孙海信(1977—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 研究方向为水声高速数据通信及信号处理。

通讯作者: 孙海信, E-mail: hxsun@xmu.edu.cn

合自适应接收机应用于水声单载波系统中，文献[5]测试了卷积码和里所(RS)码在水声系统中的性能。近年来，Turbo 码和低密度校验(LDPC)码由于性能接近 Shannon 限被逐渐引入到水声通信系统中^[6,7]，但是由于 Turbo 码的译码复杂度较高，而 LDPC 码的编码复杂度较高，使得它们的应用受到很大限制。而由 Divsalar、Jin 和 McEliece 提出的 RA 码^[8]，不仅与 Turbo 码和 LDPC 码具有同样的优越性能，还可以实现线性时间编码和线性时间译码，所以本文采用 RA 码作为水声 OFDM 系统的信道编码方案。为了解决第二个问题，最简单的一种方法是限幅法^[9]，但限幅法会对原信号的频谱产生影响，引起带外噪声和带内失真，从而降低频谱效率和系统性能。部分传输序列法(PTS)^[10]能有效降低 PAPR，但却增加了发送带宽和系统计算复杂度。选择映射法(SLM)^[11]通过生成多个相互独立且包含相同信息的信息序列，选择具有最小 PAPR 的一路时域信号进行传输，但需要牺牲部分发送带宽，文献[12]提出了一种改进的选择映射方法，这种方法通过插入附加比特、扰频器和信道编码，不需要发送边带信息。本文采用改进的 SLM 方法，将 RA 码与 SLM 结合起来，通过修改原 RA 码的累加器产生代表相同信息的不同序列，然后选择具有最小 PAPR 的序列进行发送，达到降低系统 PAPR 的目的。

1 水声 OFDM 系统

1.1 系统框架

采用 RA 编码的水声 OFDM 通信系统见图 1。发送端先将数据比特流进行 RA 编码和 QPSK 调制，形成调制信息序列，再对其进行 IFFT 操作将数据分配到不同的子载波上，加入保护间隔(为了消除 OFDM 系统的码间干扰(ISI)和子载波间干扰(ICI))，得 OFDM 调制符号，最后对发送信号进行二次调制。在接收端的操作是发送端的一个逆过程。

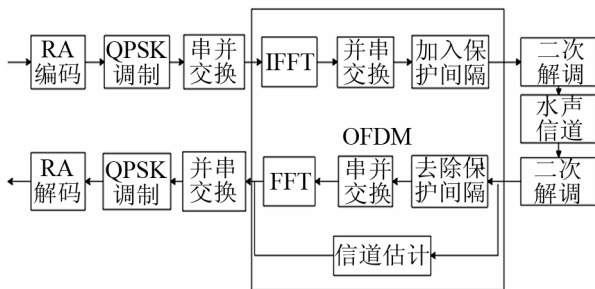


图 1 水声 OFDM 通信系统原理图
Fig.1 The principle diagram of Underwater Acoustic OFDM Communication System

假设 OFDM 系统采用的子载波数是 K ，RA 码的码率是 r bps，则有 $2rK$ 个比特数据进入到 RA 编码器中，编码后的 $2K$ 个数据经过 QPSK 调制后得到调制序列 $\{s_0, \dots, s_{K-1}\}$ 。将 OFDM 模块看成一个整体，则在接收端信号经过 OFDM 模块解调后得到第 k 个子载波 y_k 的表达式为

$$y_k = \hat{H}_k s_k + n_k, \quad k=0, \dots, K-1 \quad (1)$$

其中， \hat{H}_k 是第 k 个子载波的信道估计值， n_k 是由环境噪声、残余的 ICI 和信道估计误差组成的混合噪声。假设 n_k 的方差为 σ^2 ，QPSK 调制信号的平均能量为 E_m ，则信噪比为

$$E_s / N_0 = \frac{E_m \cdot E\{\hat{H}_k^2\}}{2\sigma^2} \quad (2)$$

接收到符号 y_k 条件概率密度函数为

$$p(y_k | s_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y_k - \hat{H}_k s_k)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中： $y_k = y_{I,k} + jy_{Q,k}$ 。将 y_k 映射成 I 路和 Q 路上的 2 个二进制比特量 $b_{I,k}$ 、 $b_{Q,k}$ ，则 $b_{I,k}$ 、 $b_{Q,k}$ 的对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR)^[13]为

$$LLR(b_{I,k}) = \ln \frac{p(b_{I,k}=0 | y_{I,k})}{p(b_{I,k}=1 | y_{I,k})} = \frac{2}{\sigma^2} y_{I,k} \quad (4)$$

$$LLR(b_{Q,k}) = \ln \frac{p(b_{Q,k}=0 | y_{Q,k})}{p(b_{Q,k}=1 | y_{Q,k})} = \frac{2}{\sigma^2} y_{Q,k} \quad (5)$$

QPSK 解调得到的软信息 LLR 送入到 RA 解码器进行迭代译码，则可以恢复出原始的信息序列。

1.2 OFDM 系统的 PAPR

OFDM 系统存在问题之一是具有较高的 PAPR 值，对功率放大器的线性要求高，系统性能极易受到影响。PAPR 值一般定义成最大瞬时功率和平均功率的比值，假设发送端 OFDM 符号为 $x(t)$ ，则 OFDM 系统的 PAPR 值为

$$PAPR = \frac{\max(|x(t)|^2)}{E[|x(t)|^2]} \quad (6)$$

降低 PAPR 的有效方法之一是选择映射法(SLM)^[11,12,14]，SLM 的思想是生成多个相互独立且包含相同信息的信息序列，信息序列经过 IFFT 变换后，选择具有最小 PAPR 的一组信息序列进行传输。为了恢复出原始信息，接收端必须知道发送端选择了哪一路信息序列进行传输，为了解决这个问题，需要将支路序号作为边带信息传输给接收端。但传送边带信息会占用发送带宽，改进的 SLM 在发送端的信息序列中插入 n 个附加比特，再经过扰频器和信道编码，产生 2^n 路相互独立的信息序列，IFFT 变换后选择 PAPR 值最小的进行传输，在接收

端经过解调后把插入的比特丢掉,就可以恢复出原始信息序列,这种方法不需要发送边带信息,能够有效地降低 OFDM 系统的 PAPR 值^[11]。

2 RA 编码

2.1 RA 码的基本原理

规则 RA 码的编码器结构如图 2 所示, N 位输入数据重复 q 次后得到 qN 位信息,再经过长度为 qN 的交织器进行随机交织,最后通过累加器进行累加。累加器可以看成是传输函数为 $1/(1+x)$,码率为 1 的递归卷积编码器。

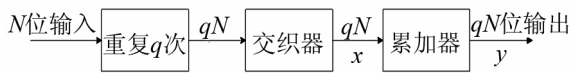


图 2 规则 RA 码编码器结构
Fig.2 The structure of regular RA encoder

RA 码的译码可采用基于置信传播(BP)的迭代译码算法^[15],也可采用类似 Turbo 码译码算法^[16,17],即分别对累加器和重复码进行译码,然后利用外信息迭代译码的方法。

2.2 改进的 RA 码结构

在文献[11]中,采用一个线性反馈移位寄存器(Linear Feedback Shift Registers, LFSR)作为扰频器产生不同的信息序列来实现 SLM。考虑到 RA 码结构中包含累加器,可以将累加器替换为实现 SLM 所需要的 LFSR,数据通过 LFSR 后产生相互独立的信息序列,则可以通过 RA 信道编码来实现 SLM,达到降低 OFDM 系统 PAPR 值的目的。在 RA 码的结构中,用 n 阶的 LFSR 替换一阶累加器,最多可以产生 2^n 个不同的信息序列。新的 RA 码结构可以采用迭代译码算法,译码时间 T_d 与 LFSR 的长度 n 有关, $T_d \propto 2^n$ 。

为了实现 SLM,发送端的信息序列进入 RA 编码器进行 q 次重复、随机交织后,插入 n 个比特并通过 LFSR 进行累加,输出 $D(1 \sim 2^n)$ 个相互独立且包含相同信息的信息序列,再经过 IFFT 变换得到时域 OFDM 符号,最终选择 PAPR 值最小的一组序列进行传输。而在接收端可以采用迭代译码方法,在解交织之前需将前 n 个比特移除,就可以恢复出原始的信息序列。系统模型如图 3 所示。本文



图 3 采用 SLM 法的系统模型
Fig.3 The System model of using SLM method

采用三阶 LFSR,其传递函数为 $1/(1+x+x^3)$,原理如图 4 所示。

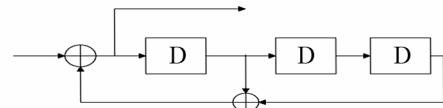


图 4 三阶 LFSR 原理图
Fig.4 The principle diagram of three-stage LFSR

3 性能仿真及水池实验

3.1 性能仿真

本文选用 Matlab 对水声 OFDM 通信系统的 PAPR 值、BER 性能进行仿真,系统参数如表 1 所示。为了提高系统的误码率性能,在接收端采用基于判决反馈的信道估计方法对信道进行估计^[18]。为了更加清晰地描述 PAPR 的改善情况,引入互补累计分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)来表示水声 OFDM 通信系统 PAPR 值的统计特性^[19]。

表 1 系统仿真参数
Table 1 System specification for simulation

参数	值
RA 码的码率	1/2
RA 码的长度	2048
RA 码的迭代次数	3
映射方法	QPSK
FFT 长度	2048
保护间隔长度	512
带宽	6kHz

系统的 CCDF 如图 5 所示。从图 5 可见,SLM 可以使系统的 PAPR 性能显著改善,大大减小了出现大峰值信号的概率,随着 D 值增大,性能的改善也随之增大,但改善的程度增加量减小。在 CCDF 为 10^{-3} 时,产生 $D=8$ 个独立信息序列,系统的 PAPR 减小了 2.7 dB 左右,有效的降低了 OFDM 系统的

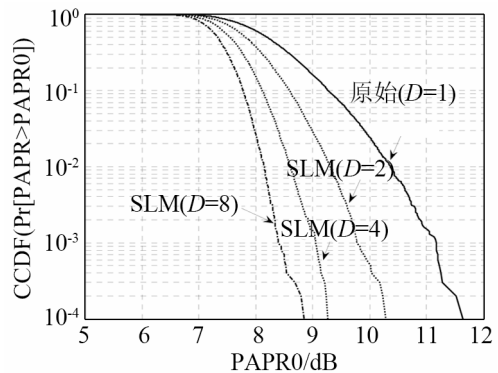


图 5 采用改进 RA 码的水声 OFDM 系统 CCDF 曲线
Fig.5 CCDFs of Underwater Acoustic OFDM Communication System using modified RA code

PAPR 值。但当 D 值过大时，进行 IFFT 的次数也增加，会增加系统的运算量，当 $D=8$ 时，PAPR 已经得到明显改善，满足系统的要求，因此本文采用 3 阶 LFSR。

图 6 所示的是没有采用信道编码、采用 RA 编码和采用改进 RA 编码的水声 OFDM 系统 BER 性能比较图。由图中可以看出，当 SNR 比较小的时候，采用信道编码的系统性能没有得到改善，但当信噪比达到水声通信可接收的信噪比范围内(10~20dB)时，随着 SNR 的增大，采用信道编码的误码率性能比没有采用信道编码的系统更快地减小，当 $BER=10^{-3}$ 时，采用 RA 编码系统获得了 4.5dB 左右的编码增益，采用改进 RA 编码的系统获得了 6dB 左右的编码增益，采用 RA 信道编码后系统 BER 性能随着 SNR 的增大有了明显的改善，说明 RA 码具有很好的纠错能力，适用于水声 OFDM 系统。

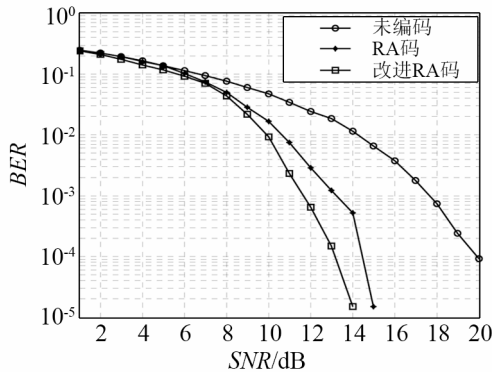


图 6 采用改进 RA 码的水声 OFDM 系统 BER 性能
Fig.6 BER performance of Underwater Acoustic OFDM Communication System using modified RA code

3.2 水池实验

为了进一步验证系统的整体性能，在厦门大学的水池中对系统的性能进行了测试。实验水池长为 25m，宽为 6m，深为 2m，为非消声水池，因此多径明显。水池环境相对静止，噪声比较小，而且水面保持平静状态。收发换能器均放在水下 0.8m 处，两者之间的距离为 10m。系统参数如表 2 所示。

在水池中进行多次实验，水池实验的结果如表

表 2 水池实验参数

Table 2 System specification for Experimental pool

参数	值
RA 码的码率	1/2
RA 码的长度	2048
映射方法	QPSK
FFT 长度	2048
保护间隔长度	512
带宽	6kHz
载波频率	30kHz
符号持续时间	341.33ms

3 所示。未编码的系统性能、采用 RA 编码和采用改进 RA 编码的系统性能平均值分别为 0.0203、0.0070 和 0.0040。采用 RA 编码后，系统性能得到了显著的改善，而采用改进 RA 编码的性能优于采用 RA 编码的性能。

表 3 水池实验结果(BER)

Table 3 Testing results in experimental pool results(BER)

测试序号	未编码	RA 编码	改进 RA 编码
1	0.0256	0.0033	0.0021
2	0.0161	0.0081	0.0045
3	0.0098	0.0037	0.0027
4	0.0109	0.0089	0.0038
5	0.0291	0.0073	0.0029
6	0.0301	0.0106	0.0077
平均	0.0203	0.0070	0.0040

3.3 半实验

为了研究不同信噪比条件下基于改进 RA 编码的水声 OFDM 系统接收端的裕度，先通过导频估计出水池实验的平均信噪比，然后在接收端的信号中添加高斯白噪声以生成多个不同信噪比的半实验数据。在本次水池实验中，我们估计出的平均信噪比为 16dB，那么生成的半实验数据信噪比范围为 1~16dB。

未采用信道编码、采用 RA 编码、采用改进 RA 编码的水声 OFDM 系统的性能如图 7 所示。观察不同信噪比下的 BER，可以研究在不同条件水声信道下的系统性能。从图 7 可以看出，与未编码、RA 编码的系统相比，基于改进 RA 编码的水声 OFDM 系统具有更大的裕度。

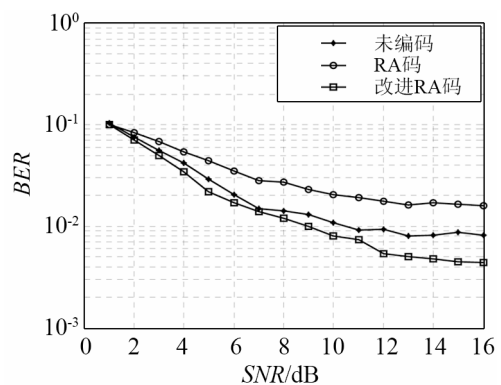


图 7 半实验 BER 性能

Fig.7 BER Performance of semi-experiments

4 结语

本文提出将 RA 码作为水声 OFDM 系统的信道编码方案，并结合 SLM 方法用 LFSR 代替原 RA 码累加器结构降低系统的 PAPR 值。仿真结果表

明, 在水声通信可接收的信噪比范围内(10~20dB), 与未采用信道编码的系统相比, 采用改进 RA 码可以明显改善系统的性能和降低系统的 PAPR 值。水池实验的结果表明, 在实际的水声信道中, RA 码切实提高了 OFDM 系统的系统性能, 可以作为水声 OFDM 系统的信道编码方案。

参 考 文 献

- [1] Stojanovic M. Acoustic (underwater) communication[M]. Encyclopedia of Telecommunications, Proakis J G Ed. John Wiley and Sons, 2003.
- [2] 肖国有, 屠庆平. 声信号处理及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
XIAO Guoyou, TU Qingping. Acoustic Signal Processing and Application[M]. Xian:Northwestern Polytechnical University Press, 1994.
- [3] WANG Z, Giannakis G B. Complex-field coding for OFDM over fading wireless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(3): 707-720.
- [4] Stojanovic M, Catipovic J A, Proakis J G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(1): 100-111.
- [5] Goalie A, Trubuil J, Beuzelin N. Channel coding for underwater acoustic communication system[C]// OCEANS, 2006: 1-4.
- [6] Huang J, Zhou S, Willett P. Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1684-1696.
- [7] Sozer E, Proakis J, Blackmon F. Iterative equalization and decoding techniques for shallow water acoustic channels[C]// OCEANS, 2001, 4: 2201-2208 .
- [8] Divsalar D, Jin H, McEliece R J. Coding theorems for "turbo-like" codes[C]// Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing, 1998, 36: 201-210.
- [9] LI Xiaodong, Leonard J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(5): 131-133.
- [10] YANG L, CHEN R S, SIU Y M, et al. PAPR reduction of an OFDM signal by use of PTS with low computational complexity[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2006, 52(1): 83-86.
- [11] Bauml R W, Fischer R F H, Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping[J]. Electronics Letters, 1996, 32(22): 2056-2057.
- [12] Breiling H, Muller-Weinfurter S H, Huber J B. SLM peak-power reduction without explicit side information[J]. Communications Letters, IEEE, 2001, 5(6): 239-241.
- [13] Kim K S, Hyun K, Yu C W, et al. General log-likelihood ratio expression and its implementation algorithm for Gray-Coded QAM signals[J]. ETRI journal, 2006, 28(3): 211-300.
- [14] Carson N, Gulliver T A. Performance of OFDM with modified RA codes and clipping[J]. Communications Letters, IEEE, 2003, 7(9): 440-442.
- [15] 高宏峰. 重复累积码及其在通信系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
GAO Hongfeng. Repeat accumulate codes and its application in communication systems[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [16] Brink S ten, Kramer G. Design of repeat-accumulate codes for iterative detection and decoding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(11): 2764-2772.
- [17] 张兰, 许肖梅, 冯玮, 等. 浅海水声信道中重复累积码性能研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(2): 179-185.
ZHANG Lan, XU Xiaomei, FENG Wei, et al. Performance Analysis of Repeat Accumulate Code over Shallow Sea Underwater Acoustic Channel[J]. Ordnance Journal, 2012, 33(2): 179-185.
- [18] SUN Haixin, GUO Yuhui, KUAI Xiaoyan, et al. Iterative block DFE for underwater acoustic single carrier system[J]. China Communications, 2012, 9(7): 121-126.
- [19] Seung Hee Han, Stanford Univ. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.