

引用格式:邢延超,李泽群,丁寒雪,等. 基于 D-SC-FDMA 的低峰均功率比多用户通信算法[J]. 微电子学与计算机,2020,37(7):66-70. [XING Y C, LI Z Q, DING H X, et al. Low PAPR multiuser communication algorithm based on D-SC-FDMA [J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(7): 66-70.]

基于 D-SC-FDMA 的低峰均功率比多用户通信算法

邢延超¹, 李泽群^{1,2}, 丁寒雪¹, 王孝威¹, 杨 光¹

(1 青岛理工大学, 信息与控制工程学院, 山东 青岛, 266000;

2 School of Electrical and Electronic Engineering, University of Technology Sydney, Sydney 2007, Australia)

摘 要: 针对水声信道复杂, 水声正交频分复用算法高峰均功率比问题, 提出了基于差分编码映射和单载波频分多址接入的低峰均功率比水声多用户通信算法。在发送端, 将源码进行差分编码转化为基带符号, 通过 N 点离散傅里叶变换将基带符号转换为频域符号, 从时域上来看, 每一个基带符号的数据信息会分布到对应频段上, 从频域上来看, 每一个频点的信息是所有基带符号在该频率值上全部频率分量; 通过 M 点离散傅里叶反变换, 将全频段的全部符号信息搬移到通频带; 添加循环前缀, 通过换能器发出。在接收端, 去除循环前缀; 通过 M 点离散傅里叶变换将通频带的时域符号转换为基带的频域符号; 再通过 N 点离散傅里叶反变换将频域符号转换成基带符号; 最后通过差分映射估计出源码。良好的仿真和试验结果验证了所提算法的有效性。

关键词: 差分编码映射; 单载波频分多址接入; 峰均功率比; 水声信道

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)07-0066-05

Low PAPR multiuser communication algorithm based on D-SC-FDMA

XING Yan-chao¹, LI Ze-qun^{1,2}, DING Han-xue¹,
WANG Xiao-wei¹, YANG Guang¹

(1 School of Information and Control, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China;

2 School of Electrical and Electronic Engineering, University of Technology Sydney, Sydney 2007, Australia)

Abstract: To solve the problem of high peak-to-average power ratio caused by underwater acoustic orthogonal frequency division multiplexing algorithm in the complex underwater acoustic channel environment, a low peak-to-average power ratio underwater acoustic multiuser communication algorithm based on Differential Coding Mapping and Single-carrier Frequency Division Multiple Access (D-SC-FDMA), is proposed in this paper. On the transmitting end, the source codes are converted into baseband symbols by differential coding mapping; the baseband symbols are converted into frequency domain symbols by N-point discrete Fourier transform. From the time domain, the data information of each baseband symbol is distributed to the corresponding frequency band and from the frequency domain, the information of each frequency point is all frequency components of all baseband symbols at the frequency value. All symbolic information of the whole frequency band is transferred to the passband by M-point inverse discrete Fourier transform. The cyclic prefix is added and the symbols are transmitted through the transducer. On the receiving end, the cyclic prefix is removed; all the symbols are moved from the passband to the baseband by the M-point discrete Fourier transform; then the frequency domain symbols are converted into the

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61771271, 61631008); 山东省自然科学基金(ZR2016FP06, ZR2017MF024, ZR2018MF002); 水声技术重点实验室项目(SSKF2018008)

baseband symbols by the N-point inverse discrete Fourier transform; finally, the source codes are estimated by differential de-mapping. Good simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: differential coding mapping; single-carrier frequency division multiple access; peak-to-average power ratio; underwater acoustic channel

1 引言

水声多用户通信技术是水下多节点同时进行信息交互的有效手段,在军用和民用领域都应用广泛,该技术的研究具有十分重要的现实意义^[1]. 正交频分多址接入技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA)是水下多用户通信的热门方案,但该技术存在发射信号峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)过高的问题^[2]. 水声信道具有多途传播特性,导致接收信号高 PAPR 问题更加严重. 高 PAPR 使接收信号波形失真,严重影响系统性能^[3].

本文在文献[4-6]的基础上提出一种基于差分编码映射和单载波频分多址接入(Differential Coding Mapping and Single-carrier Frequency Division Multiple Access, D-SC-FDMA)的低峰均功率比水声多用户通信算法. 该算法具有简单的系统结构,选取最优的参考相位进行差分编码映射,通过离散傅里叶变换将所有符号分散到各个子载波上,通过离散傅里叶反变换将同一时刻传输的符号转换为所有频域符号的线性合并,利用离散傅里叶反变换后的输出符号 $\tilde{S}(v)$ 和差分编码映射后的输入符号 $s(n)$ 的比例关系,大幅降低期望用户的 PAPR^[7].

2 D-SC-FDMA 原理

系统流程如图 1 所示. 在发送端,采用差分正交相移键控(Differential Quadrature Phase Shift Keying, DQPSK)对源码进行编码映射,得到基带符号 $s(n)$;通过 N 点离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)转换为频域符号 $s_f(k)$;对其进行子载波映射,得到频域符号 $\vec{s}_f(m)$;通过 M 点离散傅里叶反变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT),将 $\vec{s}_f(m)$ 转换为时域符号 $\tilde{S}(v)$;添加循环前缀,通过换能器发出. 通过水声信道后,在接收端完成与发送端相反的解调过程即可估计出源码^[8].

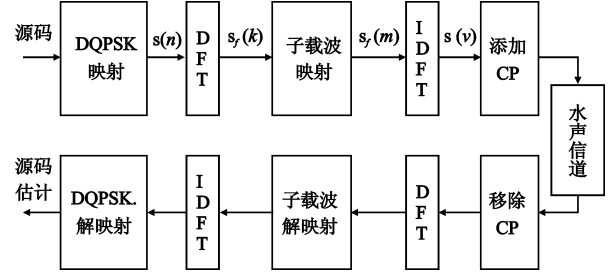


图 1 D-SC-FDMA 水声通信系统流程

DQPSK 原理如图 2 所示. 将输入源码每两位编为一组进行符号映射,得到相位信息,然后选取不同参考相位进行差分编码,确定最低 PAPR 的参考相位^[9].

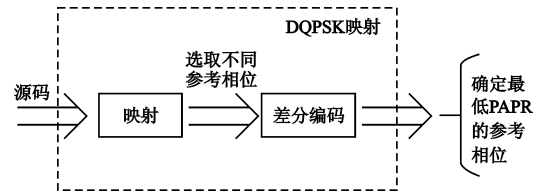


图 2 DQPSK 原理

定义 Ψ 为映射后的相位信息序列

$$\Psi = [\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{I-1}]^T \quad (1)$$

将相位信息序列分为 N 块,每块长度为 K ,满足 $I = N \times K$,则相位信息矩阵可写为

$$\Psi = \begin{bmatrix} \varphi_{0,0} & \cdots & \cdots & \cdots & \varphi_{0,K-1} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \varphi_{n,0} & & \varphi_{n,k} & & \varphi_{n,K-1} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N-1,0} & \cdots & \cdots & \cdots & \varphi_{N-1,K-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

插入一列参考相位 $\theta_r = [\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{I-1}]^T$,其中, $\varphi_n \in [\varphi_r, \varphi_r + \frac{\pi}{2}, \varphi_r + \pi, \varphi_r + \frac{3\pi}{2}]$, $\varphi_r \in [0, 2\pi]$ 可得

$$\Psi_{N \times K+1} = \begin{bmatrix} \varphi_0 & \varphi_{0,0} & \cdots & \cdots & \cdots & \varphi_{0,K-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \varphi_n & \varphi_{n,0} & & \varphi_{n,k} & & \varphi_{n,K-1} \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N-1} & \varphi_{N-1,0} & \cdots & \cdots & \cdots & \varphi_{N-1,K-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

经过差分编码后的相位信息矩阵为^[10]

$$\Phi_{N \times (K+1)} = \begin{bmatrix} \phi_{0,0} & \cdots & \cdots & \cdots & \phi_{0,K-1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \phi_{n,0} & & \phi_{n,k} & & \phi_{n,K-1} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \phi_{N-1,0} & \cdots & \cdots & \cdots & \phi_{N-1,K-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= [s(0) \cdots s(n) \cdots s(N-1)]^T$$

式中, $\phi_{n,0} = \phi_n$, $\phi_{n,k} = \phi_{n,k-1} + \varphi_{n,k-1}$ 进行 N 点 DFT, 可得

$$s_f(k) = \text{DFT}[s(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

子载波映射方式有三种, 分别为集中式、分布式和交织式^[11]. 本文采用交织频分多址接入 (Interleaved Frequency Division Multiple Access, IFDMA) 方式, 将频域符号 $s_f(k)$ 以 $Q = M/N$ 为间隔, 映射到全频段的子载波上, 如图 3 所示, 横轴表示频率.

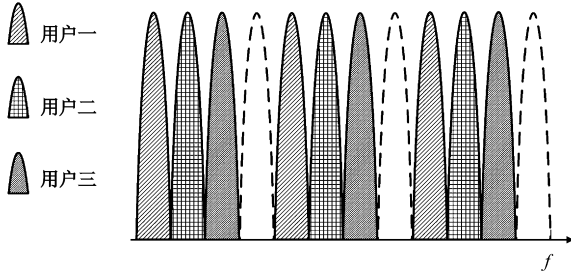


图 3 交织频分多址接入

$s_f(k)$ 映射后可得

$$\bar{s}_f(m) = \begin{cases} s_f(k), & m = kQ \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $m = 0, 1, \dots, M-1$. 令 $v = Nq + n$, 其中 $v = 0, 1, \dots, M-1, 0 \leq q \leq Q-1$. 对 $\bar{s}_f(m)$ 进行 M 点 IDFT, 可得^[12]

$$\begin{aligned} \bar{S}(v) &= \text{IDFT}[\bar{s}_f(m)] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \bar{s}_f(m) e^{j\frac{2\pi}{M}mv} \\ &= \frac{1}{QN} \sum_{k=0}^{N-1} s_f(k) e^{j\frac{2\pi}{N}k(N_q+n)} \\ &= \frac{1}{Q} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_f(k) e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \right) \\ &= \frac{1}{Q} s(n) \end{aligned} \quad (7)$$

本文研究静态水声多用户通信, 通过频分复用的方式消除了干扰用户的影响, 因此期望用户接收符号可表示为^[13]

$$\bar{R}(v) = \sum_{p=0}^{N_p} A_p \bar{S}(v - v_p) \quad (8)$$

式中, N_p 为水声信道的多途数, A_p 为第 p 条多途的衰减系数, v_p 为第 p 条多途的时延. 则 PAPR (接收符号的最高峰值功率与平均功率的比值) 可表示为^[14]

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{v=0, \dots, M-1} \{|\bar{R}(v)|^2\}}{\frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} \{|\bar{R}(v)|^2\}} \quad (9)$$

PAPR 的性能通常用互补累积分布函数 (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) 来衡量^[15]. 定义 PAPR_0 为门限值, P_r 为概率, 可得

$$\begin{aligned} \text{CCDF} &= P_r\{\text{PAPR} > \text{PAPR}_0\} \\ &= 1 - P_r(\text{PAPR} \leq \text{PAPR}_0) \\ &= 1 - (1 - e^{-\text{PAPR}_0}) \end{aligned} \quad (10)$$

3 仿真实验

实测南海远程水声信道如图 4 所示, 横轴表示时延, 纵轴表示用户, 竖轴表示幅度, 三组线分别表示用户一、二和三所通过的水声多途信道. 系统参数设定如下: 用户一发送频段为 8~9.5 kHz, 用户二发送频段为 14~15.5 kHz, 用户三发送频段为 18.5~20 kHz, 采样频率为 48 kHz, 发送端 FFT 点数 N 为 128, IFFT 点数 M 为 4096, 滤波器通带为 7.5~20.5 kHz, 同步信号为线性调频信号, 调频斜率为 50 kHz/s, 起始频率和截止频率分别为 8 kHz 和 9.5 kHz, 14 kHz 和 15.5 kHz 以及 18.5 kHz 和 20 kHz.

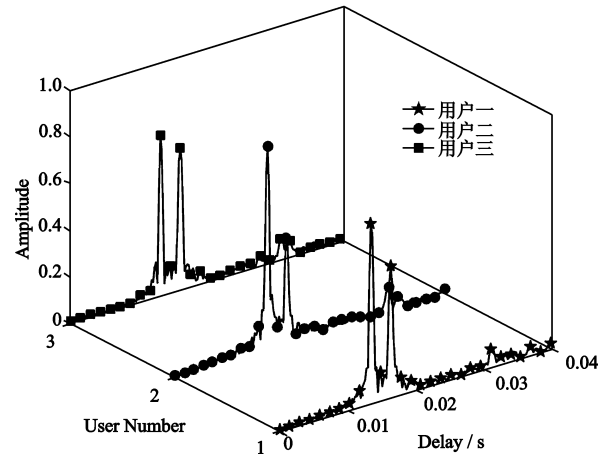


图 4 实测水声信道

D-SC-FDMA 系统和 OFDMA 系统的 PAPR 对比如图 5 所示, 横轴表示 ϕ_r , 取值间隔为 0.15, 纵轴表示 PAPR, 五角星表示 D-SC-FDMA 系统的 PAPR, 方块表示 OFDMA 系统的 PAPR. 可看出,

D-SC-FDMA 系统的 PAPR 明显低于 OFDMA 系统,两系统 PAPR 的最大差值可达 3.5 dB. 在 D-SC-FDMA 系统中,当 $\phi_r=0.94$ 时 PAPR 最高,可达 8 dB,当 $\phi_r=2.32$ 时 PAPR 最低,仅为 6.9 dB.

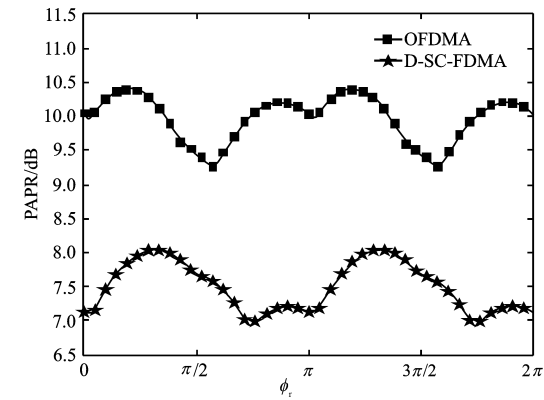


图 5 D-SC-FDMA 系统和 OFDMA 系统的 PAPR 对比

在 D-SC-FDMA 系统中,期望用户通过信道前后的 PAPR 对比如图 6 所示,方块表示期望用户通过信道前的 PAPR,五角星表示期望用户通过信道后的 PAPR. 可看出,水声信道会使期望用户 PAPR 增大, $\phi_r=3.27$ 时,PAPR 最大差值可达 1.9 dB.

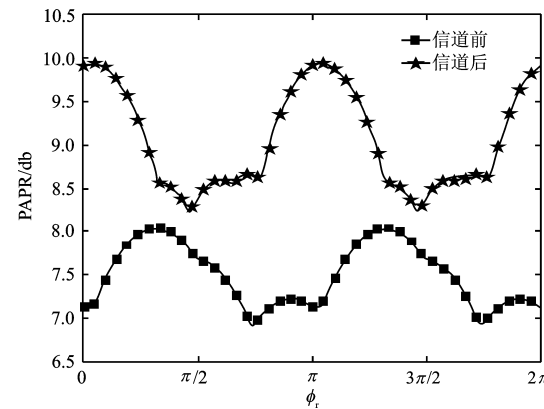


图 6 期望用户通过信道前后 PAPR 对比

D-SC-FDMA 系统与 OFDMA 系统的 CCDF 曲线如图 7 所示. 单用户系统参数设定如下:系统带宽为 13 kHz,采样频率为 48 kHz,子载波数目为 512,用户数据为16 000个符号,采用升余弦滤波器,滚降因子(表示幅频特性曲线的缓慢变化程度)为 0.3,迭代次数为10 000次. 横轴表示 PAPR₀,纵轴表示 CCDF. 当 CCDF 为 10^{-3} 时,D-SC-FDMA 系统的 PAPR 相比于 OFDMA 系统降低了 5.9 dB.

图 8 描述了三个用户分别采用 D-SC-FDMA 系统的性能,横轴表示信噪比(Signal Noise Ratio, SNR),纵轴表示误码率(Bit Error Rate, BER). 可

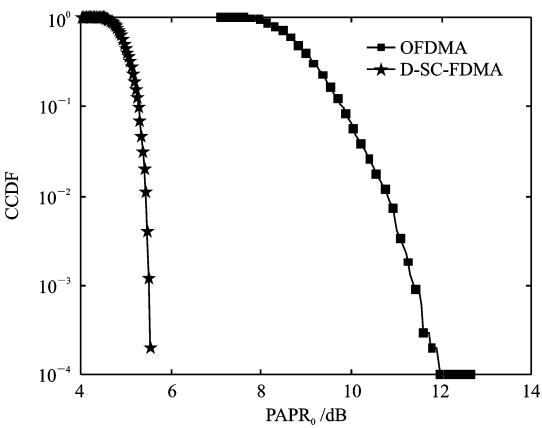


图 7 D-SC-FDMA 系统与 OFDMA 系统的 CCDF 曲线

知,在所提算法下,系统性能可以得到保障. 随着信噪比不断增大,系统误码率逐渐降低,信噪比为 6 dB 时,用户三的误码率低于 10^{-4} .

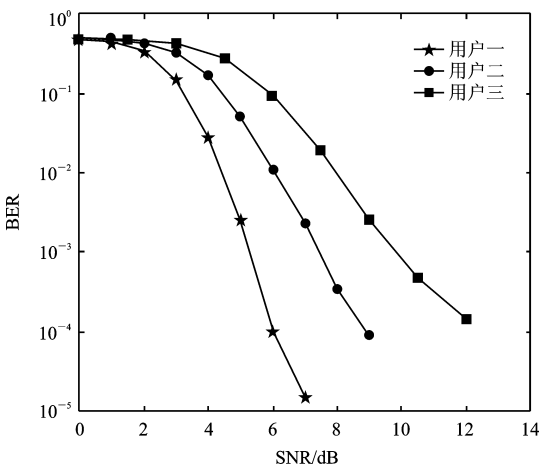


图 8 D-SC-FDMA 系统性能

4 结束语

本文提出了一种基于 D-SC-FDMA 的低 PAPR 水声多用户通信算法. 该算法采用差分编码映射技术和单载波频分多址接入技术,对水声 OFDMA 系统的高 PAPR 问题提出了降低方案. 良好的仿真和试验结果表明,D-SC-FDMA 算法具有良好的性能.

参考文献:

[1] YANG T C, YANG W B. Interference Suppression for Code-Division Multiple-Access Communications in an Underwater Acoustic Channel[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126 (1): 220-228.

[2] ANOH K, RABIE K M, ADEBISI B, et al. Root-Based Nonlinear Companding Technique for Reducing

- PAPR of Precoded OFDM Signals[J]. IEEE Access, 2017(6): 4618-4629.
- [3] LI JINWEI, REN GUANGLIANG, ZHANG HUINING. PAPR Reduction of SC-FDMA Signals via Probabilistic Pulse Shaping[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 64(9): 3999-4008.
- [4] XING SIYU, QIAO GANG, MA LU. A Blind Side Information Detection Method for Partial Transmitted Sequence Peak-to-Average Power Reduction Scheme in OFDM Underwater Acoustic Communication System[J]. IEEE Access, 2018(6): 24128-24136.
- [5] ANOH K, TANRIOVER C, ADEBISI B, et al. A new approach to iterative clipping and filtering PAPR reduction scheme for OFDM systems[J]. IEEE Access, 2017(6): 17533-17544.
- [6] KANG C, LIU Y, HU M, et al. A Low Complexity PAPR Reduction Method Based on FWFT and PEC for OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2017, 63(2): 416-425.
- [7] TAO J. DFT-Precoded MIMO OFDM Underwater Acoustic Communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 43(3): 805-819.
- [8] DIXIT S, TRIPATHI P, SHUKLA M. SC-FDMA-IDMA Scheme for Underwater Acoustic Communications[C] // Communication, Control and Intelligent Systems. Mathura, India, IEEE, 2016: 204-207.
- [9] PRASHANT K, PREETAM K. Performance Evaluation of $\pi/4$ -DQPSK OFDM over Underwater Acoustic Channels[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 91(3): 1137-1152.
- [10] 王驰. 基于差分频分复用技术的水声通信研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [11] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Peak-to-Average Power Ratio of Single Carrier FDMA Signals with Pulse Shaping[C]// International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006: 1-5 DOI: 10.1109/PIMRC.2005.1651530.
- [12] 胡家隼, 马鹏飞. OFDMA 与 SC-FDMA 峰均比对比研究[J]. 无线电工程, 2013, 43(11): 26-28.
- [13] 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.
- [14] TRIVEDI V K, KUMAR P. Carrier Interferometry Coded Single Carrier FDMA (CI/SC-FDMA) for Next Generation Underwater Acoustic Communication[J]. Wireless Personal Communications, 2017(1): 1-16.
- [15] JAWHAR Y A, AUDAH L, TAHER M A, et al. A Review of Partial Transmit Sequence for PAPR Reduction in the OFDM Systems[J]. IEEE Access, 2019(7): 18021-18041.

作者简介:

邢延超 男, (1973-), 博士, 副教授. 研究方向为信号处理.

李泽群(通讯作者) 男, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为信号处理和水声通信. E-mail: slahser123@163.com.

丁寒雪 女, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为水声通信.

王孝威 男, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为水声通信.

杨光 男, (1981-), 博士, 讲师. 研究方向为水声通信.