

# 叠加编码技术在水声 OFDM 通信系统中的应用研究

王华奎<sup>1</sup>, 孙海信<sup>2</sup>, 蒯小燕<sup>2</sup>, 吴碧<sup>1</sup>

(1. 水声对抗重点实验室, 广东湛江 524022; 2. 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建厦门 361005)

**摘要:** 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)通信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。在保证鲁棒性能的前提下, 为了能够进一步提高其吞吐量, 将叠加编码(Superposition Coding, SC)技术应用于水声 OFDM 通信系统中, 在保证基本信号的同时获得额外的信息。仿真结果和水池实验结果表明: 通过选择合适的功率分配因子, 叠加编码在保证两路信号误比特率性能的前提下, 可以提高系统的吞吐量, 具有很好的应用前景。

**关键词:** 正交频分复用; 叠加编码; 吞吐量; 水声通信

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0501-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.006

## Applied research on superposition coding technology in underwater acoustic OFDM communication system

WANG Hua-kui<sup>1</sup>, SUN Hai-xin<sup>2</sup>, KUAI Xiao-yan<sup>2</sup>, WU Bi<sup>1</sup>

(1. Science and Technology On Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. 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)

**Abstract:** Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology has become the research focus and hotspot in underwater acoustic communications owing to its advantages such as high spectrum efficiency and robustness to multipath fading. To improve the throughput of the system under the premise of guaranteeing the robust performances, superposition coding technique has been used in the underwater acoustic OFDM system which can transmit multiple data simultaneously. Simulation and experimental results show that the superposition coding technique can improve the throughput of the system under ensuring the BER performance of two signals, which have a very good application prospect.

**Key words:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); Superposition Coding(SC); throughput; underwater acoustic communication

## 0 引言

在水声通信过程中, 声信号经过具有带宽窄、载波频率低、多径延迟大等特点的水声信道后, 会产生严重的畸变, 且信号之间存在码间干扰等, 使得数据的传输速率受到严重的限制, 系统吞吐量性能低。MIMO 技术由于可以通过空间分集来抗多径衰落和提高信道容量<sup>[1]</sup>, 成为水声通信领域极具发展潜力的一项技术。但是 MIMO 技术要求换能器

配备多个水听器, 组成水听器阵, 而换能器受到电池能量方面的限制, 使得 MIMO 技术在水声通信中变得难于实现。研究人员正在寻找新的解决方案。

Cover 首次提出了叠加编码 (Superposition Coding, SC) 技术, 给出了叠加编码技术的基本思想, 并对其性能作了初步分析<sup>[2]</sup>。叠加编码由于可以同时发送多路数据来提高系统的吞吐量性能, 近年来作为高吞吐率的可行性方案备受关注<sup>[3-5]</sup>。理论上叠加编码技术可以对  $N(N \geq 2)$  个不同速率的调制信号进行叠加 ( $N$  级叠加编码), 但是在实际应用中, 采用两级叠加编码的通信系统吞吐量性能与最优的无穷多级叠加编码的通信系统性能相近<sup>[6]</sup>。叠加编码用于通信系统中可以提高系统的吞吐量<sup>[7]</sup>。

目前水声通信中还没有关于叠加编码技术研究的文献。本文将两级叠加编码技术应用于水声通

收稿日期: 2015-03-15; 修回日期: 2015-06-10

基金项目: 自然科学基金(2013J01258)、重点项目(2012H1012)资助。

作者简介: 王华奎(1977-), 男, 浙江丽水人, 博士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 孙海信, E-mail: wangwubi@163.com

信中, 以达到提高系统吞吐量的目的。

## 1 水声 OFDM 系统

采用叠加编码技术的水声 OFDM 通信系统, 发送端先将不同的数据比特流分别进行低速率的 BPSK 调制和较高速率的 QPSK 调制, 然后将这两路信号进行叠加编码, 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, 加上保护间隔, 得到 OFDM 调制符号, 最后对发送的符号进行二次调制。接收端的操作是发送端的逆过程。

假设 OFDM 采用的子载波数为  $K$ , 低速率传输的基本信号为  $x_0$ , 较高速率的附加信号为  $x_1$ 。经过叠加编码后的  $K$  个调制序列为  $\{S_0, S_1, \dots, S_{K-1}\}$ 。在 OFDM 系统中, 信道的相关时间要远大于 OFDM 的符号周期, 信道冲激响应  $h(t)$  被认为是时不变的, 可描述为

$$h(t) = \sum_{p=0}^{N_p-1} a_p \delta(t - \tau_p) \quad (1)$$

其中:  $a_p$  和  $\tau_p$  分别表示第  $p$  条路径的幅度和延时。则经过水声信道的接收端信号在 OFDM 解调后输出为

$$Y_k = \hat{H}_k S_k + N_k, \quad k=0, \dots, K-1 \quad (2)$$

其中:  $\hat{H}_k$  是第  $k$  个子载波信道的估计值;  $N_k$  是高斯白噪声。假设  $N_k$  的方差为  $\sigma^2$ , 叠加编码后的信号能量为  $E_s$ , 则信噪比为

$$E_s / N_0 = \frac{E_m \cdot E \{ |\hat{H}_k|^2 \}}{2\sigma^2} \quad (3)$$

其中:  $E_m$  为发送端信号的能量;  $N_0$  为噪声的能量。

## 2 叠加编码

### 2.1 叠加编码基本原理

叠加编码技术是指发送端可以同时发送多个不同速率的数据, 而在接收端采用一定的方法进行解码。图 1 为两级叠加编码过程。

图 1 给出了基本信号  $x_0$  和附加信号  $x_1$  进行叠加编码的星座变化图, 图 1(a)和图 1(b)表示  $x_0$  和  $x_1$  叠加之前的星座图, 图 1(c)的  $x$  表示  $x_0$  和  $x_1$  数据叠加后得到的信号。在对这组信号进行传输发送之前, 信源节点首先分别将信号  $x_0$  和  $x_1$  按图 1 所示进行独立编码, 映射到相对应的星座图上, 再进行叠加, 其中基本信号  $x_0$  和附加信号  $x_1$  的大小由相应分

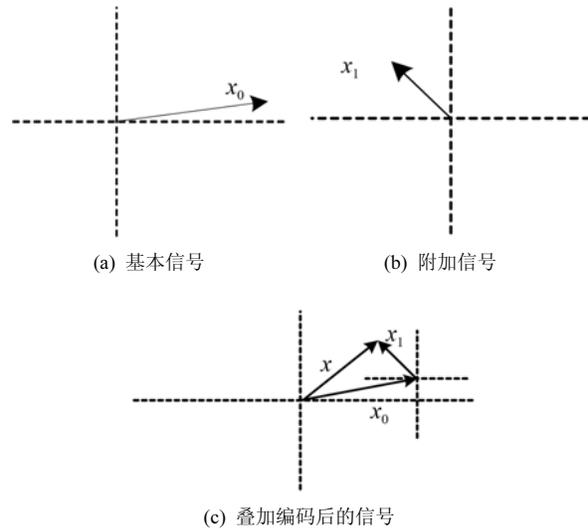


图 1 两级叠加编码的原理图

Fig.1 The theory of superposition coding

配的功率来决定。

叠加编码技术需要关注的一个问题是分配给各级速率数据的功率大小, 我们可以用功率分配因子来表示这一参量。假设叠加编码系统的总发射功率为  $P$ , 基本信号和附加信号之间的功率分配因子为  $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ , 其取值根据通信系统的信道情况来选择合适的值, 那么得到基本信号的功率为

$$P_0 = (1 - \alpha)P \quad (4)$$

而附加信号的功率为

$$P_1 = \alpha P \quad (5)$$

则叠加编码发送信号  $x$  为

$$x = \sqrt{P_0} x_0 + \sqrt{P_1} x_1 \quad (6)$$

### 2.2 叠加编码的解码

叠加编码系统在接收端一般采用连续干扰消除技术 (Successive Interference Cancellation, SIC) 来对信号进行逐级译码接收。其特点是当对其中一个信号进行译码时, 把其它信号当做干扰信号处理, 当解调出当前信号后, 再从接收端减去已经解调出的信号, 从而可以解调出其余的信号。对图 1 所示的叠加信号进行解码, 当要对基本信号  $x_0$  进行解码时, 附加信号  $x_1$  当作噪声信号; 当基本信号  $x_0$  被可靠恢复后, 将其从接收信号中减去, 再对附加信号  $x_1$  进行解码。可以看出, SIC 技术存在一个很大的缺陷, 只有对其中的一个信号正确解码后, 才可以对另外一个信号进行解码; 如果在某一个步骤中, 当检测到的数据流出错时, 从接收符号中减去这个错误的信号流时会增大干扰, 从而导致性能的下降, 我们称之为误差传播 (Error Propagation)。一般情况下, 先对低速率的信号进行解码, 然后再对高

速率的信号解码, 这是因为速率与相应的信噪比门限值成正比。

为了进一步提高 SIC 的处理性能, 通常将 SIC 技术与最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)准则进行级联组合使用, 形成 MMSE-SIC, 它是使真实信号与检测的信号的均方误差最小:

$$G_{\text{MMSE}} = \arg \min \|x - G^H y\|^2 \quad (7)$$

$$G_{\text{MMSE}} = (H^H H + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} H^H \quad (8)$$

式中:  $H$  是信道的响应,  $H^H$  是信道的复共轭转置矩阵,  $G$  是在接收端对接收信号的处理算法。从上面的公式可以看到, MMSE 同时考虑了干扰与噪声的影响, 在低信噪比的时候, 噪声的影响比较大, MMSE 检测类似于匹配滤波器; 相反, 当信噪比较高时, 主要受到其它符号的干扰, MMSE 的性能与传统的迫零均衡算法相近。

### 2.3 叠加编码误比特性能分析

误比特率取决于信号的调制方式和信噪比。如果使用 QPSK 调制技术, 那么产生的误比特率<sup>[8]</sup>为

$$P_b = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left[ \sqrt{\frac{3E_s}{(M-1)N_0}} \right] \quad (9)$$

其中:  $E_s$  是噪声功率;  $N_0$  为信道噪声功率;  $E_s/N_0$  为信噪比。从叠加编码的解码方式可以得出, 检测  $x_0$  的信号与干扰加噪声之比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为

$$\text{SINR}(x_0) = \frac{|h|^2 \cdot (1-\alpha)P}{|h|^2 \cdot \alpha P + N_0} \quad (10)$$

检测完  $x_0$  之后, 在接收端的信号中减去  $x_0$  的影响, 在剩余信号中检测  $x_1$ , 这一过程对应信号  $x_1$  的 SINR 为:

$$\text{SINR}(x_1) = \frac{|h|^2 \cdot \alpha P}{N_0} \quad (11)$$

基本信号采用 QPSK 方式调制, 附加信号采用 BPSK 调制, 可以得到基本信号的误比特率为

$$P_b(x_0) = 0.2 \exp(-g_u \cdot \text{SINR}(x_0)) \quad (12)$$

总的误比特率为

$$P_b = P_b(x_0) + (1 - P_b(x_0)) * 0.2 \exp(-g_u \cdot \text{SINR}(x_1)) \quad (13)$$

## 3 系统仿真

在仿真中, 系统发送端信号  $x_0$  和  $x_1$  分别经过 1/2 的卷积编码后送到叠加编码器中编码。其中基本信号  $x_0$  采用 QPSK 调制方式, 附加信号  $x_1$  采用 BPSK 调制方式, 仿真采用准静止的 5 径信道模型, 信道带宽为 6 kHz, 多普勒频移为 0 Hz。

首先是将信噪比固定在 20 dB,  $\alpha$  取不同值时对系统误比特率和吞吐量的性能进行仿真, 接收端采用块状导频结构, 采用最小二乘(LS)信道估计和迫零均衡(Zero Forcing, ZF)方式。图 2 是不同功率分配因子下的误比特率(Bit Error Rate, BER)性能图。从图 2 可以看出: 基本信号的误比特率随着  $\alpha$  的增大而减小。当  $\alpha=0.5$  时, 由于基本信号与附加信号相当, 基本无法正确解码。对于附加信号而言, 因为此时的信道条件比较好, 基本信号能够正确的解码, 刚开始, 性能随着  $\alpha$  的增大而减小, 但当  $\alpha \approx 0.4$  时, 由于基本信号的误比特率比较大, 此时会产生误差传播现象, 致使附加信号的性能也随着基本信号误比特率的降低而降低。而当  $\alpha$  比较大时, 性能又随  $\alpha$  的增大而减小。

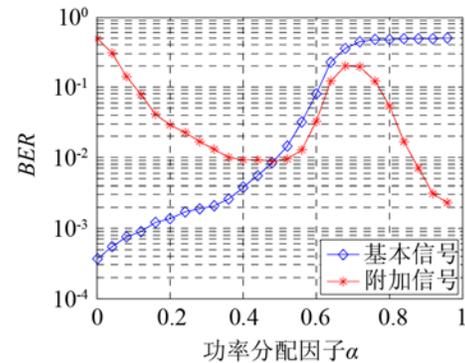


图 2 功率分配因子对误比特率(BER)的性能影响  
Fig.2 The BER performance vs. the value of  $\alpha$

图 3 是不同功率分配因子对吞吐量的性能影响。从图中可以看出: 刚开始, 吞吐量随着  $\alpha$  的增大而增大, 当  $\alpha$  增大到一定程度时, 吞吐量随着  $\alpha$  的增大而减小, 之后又随着  $\alpha$  的增大而增大。当  $0.2 \leq \alpha \leq 0.4$  区间时, 系统的吞吐量比较高。

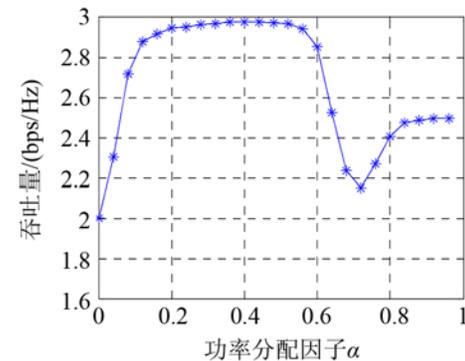


图 3 功率分配因子对吞吐量性能的影响  
Fig.3 The throughput performance vs. the value of  $\alpha$

图 4 是功率分配因子固定( $\alpha$  取值为 0.3)时, 针对不同信噪比对系统的误比特率性能进行了 MMSE-SIC 和 ZF-SIC 的性能仿真。

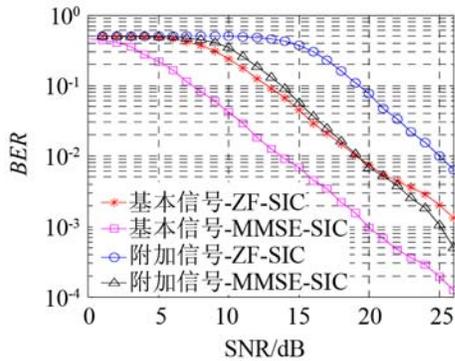


图4 不同信噪比下的 BER 性能仿真  
Fig.4 The BER performance vs. SNR

从图4可以看出,利用MMSE-SIC的性能比ZF-SIC的性能要好很多,在SNR大于10 dB时,可以获得约5 dB左右的增益,这是因为叠加编码时,在解调基本信号时,由于把附加信号当作了噪声干扰,所以噪声对解调性能的影响特别大,而ZF没有考虑噪声的影响,MMSE则考虑了噪声干扰,所以MMSE相比于ZF可以获得较大的性能增益。

## 4 水池实验结果

对功率分配因子 $\alpha=0.3$ 的叠加编码OFDM系统进行了水池实验,其中基本信号采用QPSK调制方式,附加信号采用BPSK调制方式,信号带宽为6 kHz,各个节点之间相距15 m,换能器距水面深度均为0.7 m。共进行了6次实验,然后进行数据统计分析。从表1可以得到,基本信号平均误比特率为 $1.5 \times 10^{-3}$ ,附加信号平均误比特率为 $6.6 \times 10^{-3}$ ,因此采用叠加编码OFDM系统在水声通信中有着良好的效果。

表1 叠加编码水池实验结果( $10^{-3}$ )

Table 1 Experimental results of superposition coding( $10^{-3}$ )

实验序号	1	2	3	4	5	6	平均误比特率
基本信号误比特率	1.6	1.7	1.5	1.4	1.1	1.6	1.5
附加信号误比特率	6.7	7.0	6.4	6.2	6.	6.9	6.6

## 5 结语

本文提出将叠加编码技术应用于水声正交频分复用通信系统中,仿真结果表明,叠加编码技术中通过选择适当的功率分配因子在0.2到0.5区间取值时,可以保证两路信号的误比特率性能基本接近,达到系统的误比特率可以接受的范围。同时,在保证两路信号误比特率性能接近的前提下,可以提高系统的吞吐量。

## 参 考 文 献

- [1] LI B, HUANG J, ZHOU S, et al. MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications[J]. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 2009, 34(4): 634-644.
- [2] Csiszár I, Korner J. Broadcast channels with confidential messages[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1978, 24(3): 339-348.
- [3] Karabulut G, Yongacoglu A. Rate design rule for superposition coded modulations[C]// Electrical and Computer Engineering, 2004. Canadian Conference on. IEEE, 2004, 1: 365-368.
- [4] Etemadi F, Jafarkhani H. Rate and power allocation for layered transmission with superposition coding[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2007, 14(11): 773-776.
- [5] DU Q, ZHANG X. Adaptive power and rate allocation for mobile multicast throughput optimization over fading channels in wireless networks[C]// Computer Communications and Networks, 2006. ICCCN 2006. Proceedings. 15th International Conference on. IEEE, 2006: 261-266.
- [6] LIU Y, Lau K N, Takeshita O Y, et al. Optimal rate allocation for superposition coding in quasi-static fading channels[C]// Information Theory, 2002. Proceedings. 2002 IEEE International Symposium on. IEEE, 2002: 111.
- [7] Yuksel M, Erkip E. Broadcast strategies for the fading relay channel[C]// Military Communications Conference, 2004. MILCOM 2004. 2004 IEEE. IEEE, 2004, 2: 1060-1065.
- [8] 吴伟陵, 牛凯. 移动通信原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.