

基于 Turbo 信道编码的 SC-FDE 系统

刘顺兰, 刘小云, 刘婷婷

(杭州电子科技大学通信工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对传统单载波频域均衡(SC-FDE)系统在复杂多径信道下误码率较高的问题, 提出基于 Turbo 信道编码的 SC-FDE 系统。研究该系统在瑞利衰落信道下的误码率, 比较不同 Turbo 译码方法和不同译码迭代次数下的系统性能。仿真结果表明, 与无信道编码的 SC-FDE 系统相比, 基于 Turbo 编码的 SC-FDE 系统误码率降低了 5 个数量级, 在信噪比为 10 dB 的情况下可以达到 10^{-7} , 增强了数据传输的可靠性, 更适合未来高速高效通信的要求。

关键词: Turbo 编码; 单载波频域均衡; LOG-MAP 译码算法; 瑞利衰落信道

SC-FDE System Based on Turbo Channels Encoding

LIU Shun-lan, LIU Xiao-yun, LIU Ting-ting

(College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

【Abstract】 This paper proposes a Single-Carrier Frequency-Domain Equalizer(SC-FDE) system based on Turbo channel coding, and performance under the circumstance of the Rayleigh fading channel is analyzed. Moreover, comparisons among different decoding and different iteration times are given for the higher Bits Error Rate(BER) of the traditional SC-FDE system in the complex multipath channel. Simulation results show that the BER of SC-FDE system based on Turbo channel encoding can be reduced five orders of magnitude in comparison with SC-FDE without channel coding system, and BER of the proposed system can be reduced to 10^{-7} with a 10 dB signal to noise ratio. The reliability of SC-FDE system is enhanced. Hence, it is expected that the system can merge into the future high-speed and high-performance communications.

【Key words】 Turbo encoding; Single-Carrier Frequency-Domain Equalizer(SC-FDE); LOG-MAP decoding algorithm; Rayleigh fading channels

1 概述

在对抗多径衰落信道方面, 基本的传输技术可以分为单载波和多载波两大类。传统的单载波时域均衡系统抽头系数太多, 往往难以实现, 更难以实现高速高效的传输, 而单载波频域均衡系统接收端采用 FFT 变换对数据块进行处理, 大大降低了接收端的复杂度, 提高了系统效率。和多载波技术的 OFDM 相比, 单载波频域均衡(SC-FDE)系统避免了多载波系统在各相位同时峰均功率比(PAPR)过大的问题, 这样在设计中可以采用更经济高效的功率放大器, 系统的稳定性也更高^[1]。近年来, 单载波频域均衡的研究越来越多, 基本集中在对均衡方法的改进方面, 系统性能也有所提高。为了进一步提高系统性能, 降低系统的误码率, 本文将 Turbo 信道编码技术应用于单载波频域均衡(SC-FDE)系统中, 研究了在瑞利衰落信道下, 加入 Turbo 编码之后单载波频域均衡系统的性能, 并比较了不同信道译码方法和不同迭代次数下的系统性能, 研究发现加入 Turbo 编译码之后, 可以有效降低单载波频域均衡系统的误码率, 提高系统性能。

2 系统模型

本文中基于 Turbo 编码的单载波频域均衡系统原理框图如图 1 所示。发送端输入数据 x_m 经过 Turbo 编码和 QPSK 调制成为高速率单载波信号, 然后插入保护间隔再经过瑞利衰落信道, 在接收端 a_m 是去掉保护间隔之后的数据, z_m 为经过频域均衡器之后的输出数据, r_m 是进行 QPSK 解调后的输出数据, 然后再经过 LOG-MAP 译码, 得到输出数据 \hat{x}_m 。图 1 中虚线框内为频域均衡器框图。

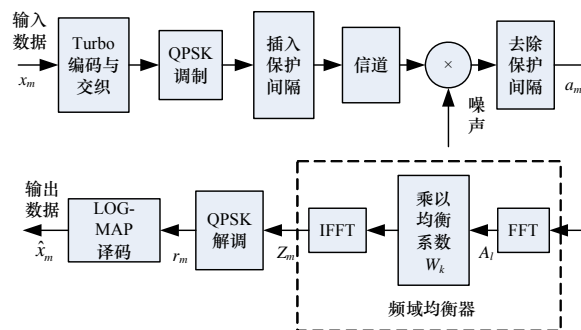


图 1 基于 Turbo 编码的单载波频域均衡系统原理图

3 Turbo 编译码和单载波频域均衡基本原理

3.1 Turbo 编译码的基本原理

Turbo 码又称为带交织的并行级联卷积码(PCCC)。典型的 Turbo 码编码器主要由 2 个分量编码器、交织器以及删余矩阵和复接器组成。Turbo 码获得优异性能的一个重要方面就是使用了交织器, 它在将信息序列比特送入下一级编码器之前对它们进行重新排列, 减少了紧邻码字的数量, 提高了编码的纠错能力。Turbo 码获得优异性能的第 2 个重要方面就是采用了基于最大后验概率(MAP)准则的迭代译码, 从图 1 中可以看到本文中译码方法为 LOG-MAP 迭代译码。

作者简介: 刘顺兰(1965-), 女, 教授, 主研方向: 自适应信号处理, 盲信号处理, 通信信号处理, 空间谱估计; 刘小云、刘婷婷, 硕士研究生

收稿日期: 2009-11-18 **E-mail:** liushunlan@hdu.edu.cn

码器的基本结构如图 2 所示, 在迭代译码过程中, 每次迭代都要分 2 个阶段完成, 第一阶段完成一个分量编码器输出码元的译码, 得到关于信息码元可靠性的附加信息作为第 2 个分量编码器的输入。框图中 $L(\hat{x})$ 表示 LOG-MAP 译码器输出的后验信息, $L(x)$ 表示先验信息, $L_c r$ 表示解调器输出的信道参量, $L_c(x)$ 表示与 $L(\hat{x})$ 相应的外部信息, i 表示当前码元。

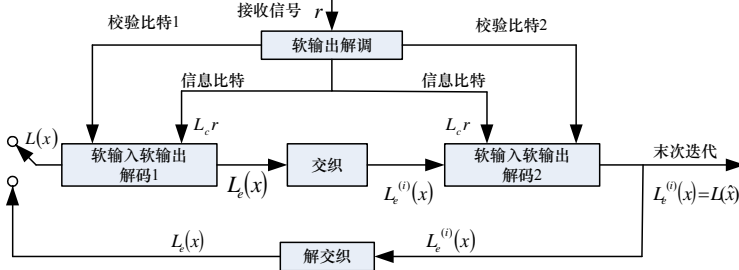


图 2 Turbo 码 LOG-MAP 译码框图

以二进制为例, 令电平-1 和+1 分别代表二进制码元 0 和 1, 对于传输比特 $x=1$ 及 $x=-1$, 将 LOG-MAP 译码器的输出定义为后验信息概率比, 即

$$L(\hat{x}) = \lg \frac{P(x=1|r)}{P(x=-1|r)} \quad (1)$$

其中, r 是解调器输出信号矢量。在计算 $L(\hat{x})$ 的过程中, 解码器使用了先验信息 $L(x)$ 以及解调器输出的信道参量 $L_c r$ 。先验信息定义为先验信息概率比, 即

$$L(x) = \lg \frac{P(x=1)}{P(x=-1)} \quad (2)$$

对于系统码而言, 信息比特的软输出可以表示为 3 项之和, 即

$$L(\hat{x}) = L_c r + L(x) + L_c(\hat{x}) \quad (3)$$

其中, $L_c(\hat{x})$ 用于在两解码器之间作交换。在迭代译码算法的首次迭代中, 解码器 1 计算得出外信息:

$$L_{e1}(\hat{x}) = L_1(\hat{x}) - [L_c r + L(x)] \quad (4)$$

如果信息比特在发端等概率分布, 则此处 $L(x)=0$ 。第 1 个译码器算出的外部信息经适当交织后被送到解码器 2, 解码器 2 以 $L_{e1}(\hat{x})$ 为先验值代替上式 $L(x)$ 来计算 $L_2(\hat{x})$ 。于是解码器 2 又算得每个信息比特的外信息值为

$$L_{e2}(\hat{x}) = L_2(\hat{x}) - [L_c r + L_{e1}(\hat{x})] \quad (5)$$

接着, 解码器 1 再利用外信息值 $L_{e2}(\hat{x})$ 作为第 2 次迭代的先验信息。迭代按此算法反复进行。

迭代过程通常是在完成了预定迭代次数后中止, 这时软输出值 $L_2(\hat{x})$ 已趋稳定, 在前后 2 次迭代中变换甚微。在最后一次迭代中, 解码器 2 在计算软输出时将 2 个外信息值结合在一起:

$$L_2(\hat{x}) = L_c r + L_{e1}(\hat{x}) + L_{e2}(\hat{x}) \quad (6)$$

除了 LOG-MAP 算法外还有几种对 MAP 迭代译码算法的改进算法, 如 MAX-LOG-MAP 算法、基于线性拟合的 LOG-MAP 算法。MAX-LOG-MAP 算法是将各度量函数的计算放在对数域上, 将大量的乘法运算转化为加法运算。MAX-LOG-MAP 算法只是一种近似的算法, 与真正的 MAP 算法存在译码性能上的差异, LOG-MAP 算法则修正了 MAX-LOG-MAP 因近似带来的译码性能下降, 本质上等同于 MAP 算法。线性拟合的 LOG-MAP 算法是用分段的线性函数

来拟合 LOG-MAP 算法的非线性函数, 性能介于 LOG-MAP 算法和 MAX-LOG-MAP 算法之间^[2-3]。

3.2 单载波频域均衡方法

图 1 中虚线框内为单载波频域均衡器的结构框图, 基本思想是通过 FFT 变换到频域, 在频域进行均衡, 均衡系数为 W_l , 然后通过 IFFT 运算将均衡之后的信号变换到时域以便对数据符号进行检测判决输出。 x_m 是系统输入数据, a_m 是接收端接收信号数据, 即频域均衡器的输入数据, A_l 是输入数据 a_m 经过 M 点 FFT 运算之后的数据, z_m 是频域均衡后经 IFFT 运算的数据, \hat{x}_m 为检测判决的输出数据。系统的符号周期是 T , 采样率为 $1/T$, 每一个数据块中数据长度为接收端 FFT 运算的点数。

设系统具有理想的符号同步和采样时钟同步条件, 接收信号数据 a_m 可以表示为

$$a_m = \sum_{k=0}^{M-1} x_k h_{m-k} + v_m \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (7)$$

其中, h_m 为信道的冲激响应; v_m 是零均值、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。通过 FFT 变换的频域信号 A_l 可以表示为

$$A_l = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp\left(-j2\pi \frac{ml}{M}\right) \quad 0 \leq l \leq M-1 \quad (8)$$

信号 z_m 可以表示为

$$z_m = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} W_l A_l \exp\left(j \frac{2\pi}{M} lm\right) \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (9)$$

将式(7)代入式(8)可以得到

$$A_l = H_l X_l + V_l \quad 0 \leq l \leq M-1 \quad (10)$$

由此得到

$$E(A_{l_1} A_{l_2}^*) = M H_{l_1} H_{l_2}^* \delta(l_1 - l_2) + M \sigma^2 \delta(l_1 - l_2) \quad 0 \leq l_1, l_2 \leq M-1 \quad (11)$$

均衡器的判决误差信号定义为

$$e_m = z_m - x_m \quad (12)$$

频域均衡的目的就是要通过选择合适的系数 W_l 使得均方误差 $E(|e_m|^2)$ 最小, 由式(10)~式(12)可得:

$$E(|e_m|^2) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} |W_l H_l - 1|^2 + \frac{\sigma^2}{M} \sum_{l=0}^{M-1} |W_l|^2 \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (13)$$

对式(13)求导:

$$\frac{\partial E(|e_m|^2)}{\partial W_l} = \frac{2}{M} W_l H_l H_l^* - \frac{2}{M} H_l^* + \frac{2}{M} \sigma^2 W_l \quad (14)$$

令式(14)为 0, 可得到

$$\hat{W}_l = \frac{\hat{H}_l^*}{\sigma^2 + |\hat{H}_l|^2} \quad 0 \leq l \leq M-1 \quad (15)$$

其中, H_l^* 是 H_l 的共轭; \hat{H}_l 是通过信道估计得出的 H_l 的估计值; \hat{W}_l 是 W_l 的估计值^[4-5]。

4 实验仿真及结果分析

本文对基于 Turbo 编码技术的单载波频域均衡系统进行仿真, 仿真中采用 QPSK 调制, 通过瑞利衰落信道, 所加噪声为加性高斯白噪声。在使用 Turbo 编码时, 生成矩阵按照 3GPP 标准为 $[1 \ 1 \ 0 \ 1; 1 \ 0 \ 1 \ 1]$, 码率为 1/3。

图 3 是在瑞利衰落信道下基于 Turbo 编码的单载波频域均衡系统误码率仿真结果, 译码方式采用 LOG-MAP 译码算

法。由图 3 可以看出迭代次数对译码性能有较大的影响, 迭代次数越多, 误比特率越小。在开始迭代时误码率降低的速度较快, 随着迭代次数增加, 误码率降低的速度会相对缓慢。通过仿真还可以发现, 迭代次数越多, 译码时间也越长。所以在实际应用中要折中考虑, 权衡迭代所需要的时间和性能改善程度两者的关系后, 合理地选择译码迭代次数。

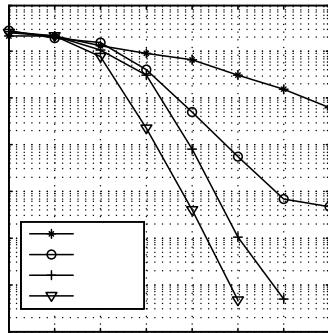


图 3 基于 Turbo 编码的 SC-FDE 系统在不同迭代次数下的误码率

图 4 是在单载波频域均衡系统中无信道编码和加入 Turbo 编码时的误码率仿真结果, 可以看出信道编码可以有效地减小信道误码率, 提高系统可靠性。

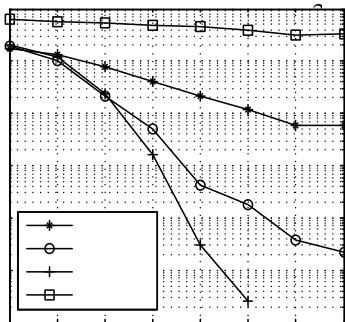


图 4 SC-FDE 系统无信道编码和加入 Turbo 编码的误码率

图 5 是 3 种不同 Turbo 译码方法一次迭代下仿真结果, 即 LOG-MAP 算法、MAX-LOG-MAP 和基于线性拟合的 LOG-MAP 算法。由图 5 可以看出, 在迭代次数相同的情况下, LOG-MAP 算法的性能是最好的, MAX-LOG-MAP 性能较差, 线性拟合的 LOG-MAP 算法介于两者之间。

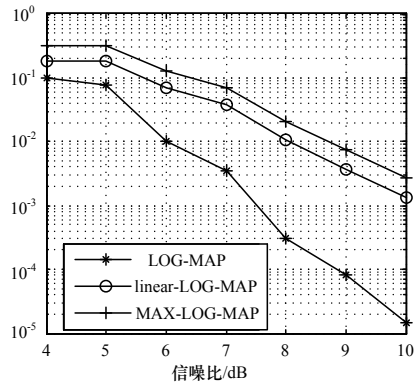


图 5 Turbo 编码的 SC-FDE 系统在不同译码方式下的误码率

5 结束语

本文研究了将 Turbo 编码技术应用于单载波频域均衡系统的方案和误码率情况, 并对瑞利衰落信道下的误码率做了分析, 将未编码系统和加入 Turbo 信道编码下的误码率做了比较, 分析了 3 种不同译码方式下的系统性能。从仿真结果可以看出, Turbo 码有非常优异的编码性能, 将其应用于 SC-FDE 系统可以有效地降低误码率, 适合将来通信系统高速高效的要求。

参考文献

- [1] 刘莹, 向维. 一种单载波频域均衡方案及性能仿真[J]. 工程实践及应用技术, 2007, 33(5): 50-52.
- [2] 张力军, 张宗橙, 郑宝玉. 数字通信[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 374-376.
- [3] Kaligineedi P, Bharagva V K. Frequency-domain Turbo Equalization and Multiuser Detection for DS-UWB Systems[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2008, 7(9): 3280-3284.
- [4] Liu Y, Letaief K B. Single Carrier Frequency Domain Equalization with Time Domain Noise Prediction for Wideband Wireless Communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2006, 5(12): 3548-3557.
- [5] Pandana C, Sun Yan, Liu K J R. Channel-aware Priority Transmission Scheme Using Joint Channel Estimation and Data Loading for OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 3297-3310.

编辑 任吉慧

(上接第 269 页)

采用上述方法得到的拐点的位置信息就是需要通过空中接口传回控制中心的数据, 为了进一步减少需要进行传输的数据量, 本文使用了数据压缩算法对拐点的位置信息做了进一步的压缩。

4 结束语

经实验证明, 在保证轨迹恢复达到一定精度要求的前提下, 利用拐点对定位信息进行精简的方法是完全可行的, 而采用联合判断法比逐点判断法更准确、压缩比更高。但该方法还存在一些弊端, 如拐点过多、轨迹准确率等问题, 有待

进一步的研究。

参考文献

- [1] Kaplan E D. GPS 原理与应用[M]. 邱致和, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 李明峰, 冯宝红, 刘三枝. GPS 定位技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 徐绍铨, 张华海, 杨志强, 等. GPS 测量原理及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.

编辑 张帆