

编码技术在SC-FDE系统中的应用研究

王 克, 刘顺兰*

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对传统的单载波频域均衡系统(SC-FDE)在信道变化迅速、多普勒频移大的复杂多径信道下误码率较高、可靠性较差等问题,分别研究了基于LDPC编码和基于Turbo编码的SC-FDE系统,并在不同的航空莱斯信道下,分别对基于两种不同编码技术的SC-FDE系统进行了系统建模,同时对其系统信噪比和误码率曲线进行了Matlab仿真。仿真研究结果表明:应用编码技术的SC-FDE系统的误码率明显地降低;基于LDPC编码的SC-FDE系统,在地空信道下输入信噪比为14 dB时可以达到接近 10^{-6} 的误码率;与基于Turbo编码的SC-FDE系统相比,基于LDPC编码的SC-FDE系统在地空信道下误码率为 10^{-3} 时有1 dB的编码增益,且没有误差平底现象,可以有效地提高信息传输的可靠性;该系统更适合未来高速、高效通信的要求。

关键词: 单载波频域均衡;LDPC编码;Turbo编码;误码率;莱斯信道

中图分类号: TN911 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)05-0609-04

Application and study of code technique in SC-FDE system

WANG Ke, LIU Shun-lan

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

Abstract: Aiming at the high bit error rate (BER) and unreliability of traditional single carrier frequency domain equalization (SC-FDE) in complex multipath environment, where the channel is changing rapidly and Doppler frequency shift is large, SC-FDE system based on LDPC and Turbo code were studied and their modeling were built respectively. Under the air Ricean channel, the curve of systemic signal-to-noise ratio with the bit-error-ratio was simulated by Matlab. The simulation results indicate that the BER of SC-FDE system with code technique has dramatically reduced. When the input of SNR is 14dB, the BER of SC-FDE system based on LDPC is closed to 10^{-6} . In ground to air channel, compared with the SC-FDE system based on Turbo code, the SC-FDE system based on LDPC code achieves 1 dB coding gain and does not have error-floors when BER is about 10^{-3} . Therefore the SC-FDE system based on code technique can enhance the reliability of the information transmission, to meet requirements of high speed and efficient of future communication.

Key words: single carrier frequency domain equalization(SC-FDE); LDPC code; Turbo code; bit error rate(BER); Ricean channel

0 引 言

在宽带无线接入系统的应用中,由多径传输引起的频率选择性衰落严重地影响通信的可靠性。常用的抗衰落的方法有:正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)和单载波频域均衡(SC-FDE)等技术,但是由于OFDM信号一般具有很大的峰值平均功率比(peak to average power ratio, PAPR),当对OFDM信号进行放大时,容易产生非线性失

真,且该方法对载频同步、定时误差很敏感^[1]。而SC-FDE有与OFDM相似的结构和性能,且SC-FDE发送序列的峰均比远小于OFDM的峰均比,同时该方法又能减轻载波同步问题,因此系统的稳定性也更高。当然SC-FDE也可以与OFDM结合使用,以达到更灵活、更高效地发挥两者的优势。同时,SC-FDE也可与多输入/多输出技术相结合,以提高频谱的利用率,改善系统的整体性能。所以SC-FDE是宽带无线通信系统的有效解决方案,被认为是未来宽带无线通信的主

收稿日期:2011-11-30

作者简介:王 克(1986-),男,浙江温州人,主要从事信号处理方面的研究。E-mail:wk109232448@163.com

通信联系人:刘顺兰,女,教授,硕士生导师。E-mail:liushunlan@hdu.edu.cn

要支撑技术之一。但是在快变多径衰落信道(例如航空信道)中,SC-FDE的可靠性差,系统性能难以提高,误码率高。低密度奇偶校验码(LDPC)是一种基于稀疏校验矩阵的线性分组码,由Gallager于1962年提出,由于受限于当时的计算机处理能力和缺乏相关理论支撑,该码未受到重视,直到1996年Mackay提出它是一种接近Shannon极限的纠错码^[2]。目前,LDPC码成为编码领域的研究热点之一^[3]。Turbo码自1993年被提出后,因其在强噪声低信噪比的条件下,迭代后仍具有极低的误码率而受到研究学者的广泛关注^[4]。

本研究将目前编码领域的两大热门技术Turbo编码和LDPC编码应用于SC-FDE系统,以期降低系统的误码率,有效地提高系统的可靠性。

1 基于编码技术的单载波频域均衡系统

1.1 系统模型

应用编码技术的单载波频域均衡系统模型如图1所示。

图1中,发送端输入数据 x_m 经过编码、调制后,插入保护间隔送入信道,在接收端去除保护间隔,并将接收符号 y_m 变换到频域进行频域均衡,之后再变换到时域,然后进行解调、译码得到输出数据 $\hat{x}_m$ 。

本研究设一个传输数据块的长度是 N ,信道冲激响应为 h_m ,则接收到的数据符号 y_m 可表示为^[5]:

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

式中: v_m —零均值、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

因插入了保护间隔,式(1)两边经过 N 点离散傅里叶变换后可得:

$$Y_l = X_l H_l + V_l \quad 0 \leq l \leq N-1 \quad (2)$$

式中: H_l —信道频率响应; Y_l , X_l — y_m 和 x_m 的 N 点DFT。

对 Y_l 进行频域均衡后再经过逆傅里叶变换可得:

$$z_m = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} W_l Y_l \exp(j \frac{2\pi}{N} lm) \quad 0 \leq m \leq N-1 \quad (3)$$

式中: W_l —频域均衡系数。

本研究采用最小均方误差算法确定均衡系数,即 $W_l = H_l^* / (\sigma^2 + |H_l|^2)$, $0 \leq l \leq N-1$, H_l^* 是 H_l 的共轭。

1.2 LDPC 编译码基本原理

1.2.1 LDPC 编码原理

LDPC是一种基于稀疏矩阵和概率迭代译码的线性分组纠错码。首先构造具有指定性质的奇偶校验矩阵,规则码 (n, q, p) 由它的校验矩阵 H 来定义,其中 $q < p < n$ 。校验矩阵 H 有 n 列即码长为 n ,每列有 q 个非零元素,每行有 p 个非零元素。一般地,线性分组码可由生成矩阵 G 利用编码公式 $x = sG$ 得到,其中 s 为信息比特,校验矩阵 H 与生成矩阵 G 的关系为 $HG^T = 0$,若想通过变换将LDPC码的校验比特放在前面,信息比特放在后面,LDPC直接编码的方法就是:对原校验矩阵 H 进行高斯消元及列变换得到一个新的校验矩阵 $newH = [I \ P]$,同时记录列变化的顺序,然后由生成矩阵 $newG = [P^T \ I]$ 对信息比特 s 进行编码: $u = s \times newG = s \times [P^T \ I] = [sP^T \ s]$,再按列交换相反的顺序对 u 进行交换,即可得信息比特 s 经过校验矩阵 H 后对应的LDPC编码后的码字 x 。

1.2.2 LDPC 译码原理

BP译码算法是一种迭代概率译码算法,LDPC码的BP算法是基于编码的二分图结构,LDPC码校验矩阵的稀疏性使得其在线性时间内实现译码成为可能。在每一轮迭代中,本研究都要对码字中各个比特关于接收码字和信道参数的后验概率进行估算,因此准确地说,BP译码算法是一种逐比特最大后验概率算法,同时当码字较长时,距离很远的信息比特可能参与同一校验,使得译码受连续突发差错的影响不大,故码本身具有很好的抗突发差错的能力^[6]。

1.3 Turbo 编译码基本原理

1.3.1 Turbo 编码原理

典型的Turbo编码器如图2所示。它主要由两个并联的分量编码器、交织器、删余矩阵和复接器组成,其中分量码选择递归系统卷积码^[7]。

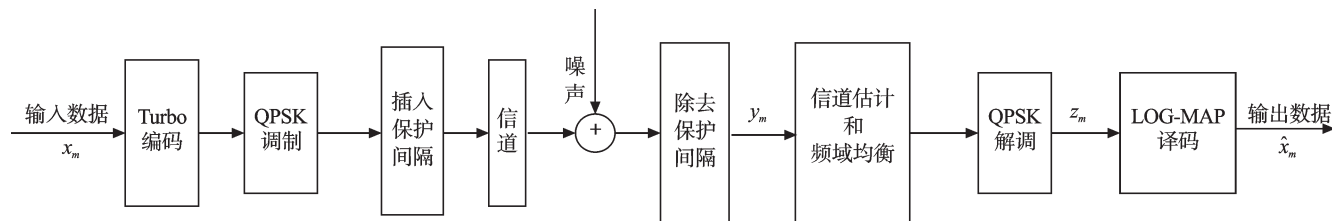


图1 基于编码技术的单载波频域均衡系统框图

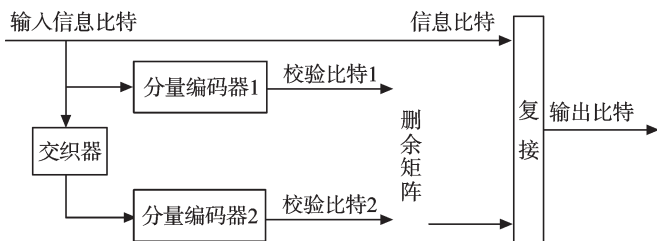


图2 Turbo编码器

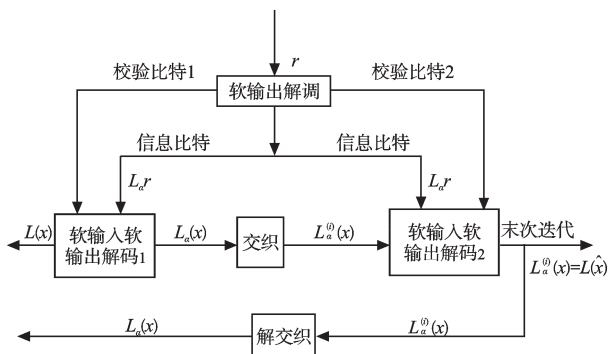


图3 Turbo码LOG-MAP译码框图

1.3.2 Turbo译码原理

本研究采用基于最大后验概率准则(MAP)的LOG-MAP迭代译码,其框图如图3所示,在迭代译码过程中,每次迭代分两个阶段进行,在第一个阶段完成一个分量编码器输出码元的译码后,得到有关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^[8-10]。

2 实验仿真与结果分析

本研究在Matlab环境下对基于Turbo编码和LDPC编码的SC-FDE系统在地空、空空信道下进行了仿真,为减小多普勒频移对误码率性能的影响,仿真时对信道进行了频偏补偿。仿真中采用QPSK调制,所加噪声是加性高斯白噪声,FFT长度为64,保护间隔长度为32,Turbo编码和LDPC编码的码率都是9/10,Turbo译码时迭代译码次数是10次。空空信道和地空信道的飞机飞行速度分别为600 m/s和300 m/s,莱斯因子都是12 dB,到达信号的角度分布都为178.25°~181.75°,在这种情况下,地空信道和空空信道都为莱斯分布的信道。

地空信道下基于Turbo编码和LDPC编码的SC-FDE系统的误码率性能如图4所示。

在空空信道下基于Turbo编码和LDPC编码的SC-FDE系统的误码率性能如图5所示。可以看到,SC-FDE系统在无信道编码的情况下,误码率性能极差,信道编码可以有效地降低系统的误码率,系统的可靠性高,在有较大多普勒频移的快变信道下,编码后的

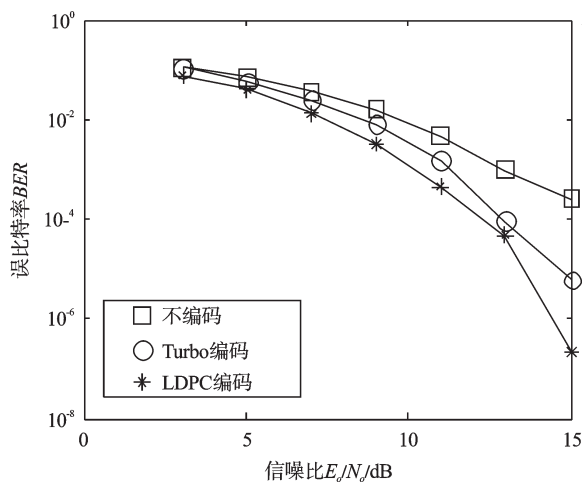


图4 地空信道下基于编码的SC-FDE系统的误码率

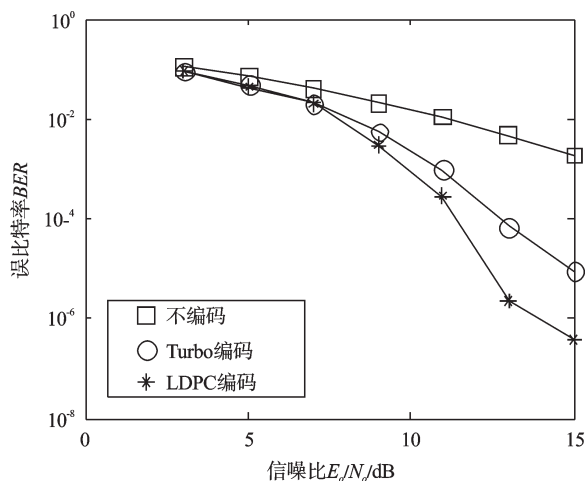


图5 空空信道下基于编码的SC-FDE系统的误码率

系统仍能得到理想的误码率。在地空信道和空空信道中,在较小信噪比情况下,基于Turbo码的SC-FDE系统和基于LDPC码的SC-FDE系统有相近的误码率,但随着信噪比的增加,基于LDPC码的SC-FDE系统的下降趋势比基于Turbo码的SC-FDE系统更大。而且随着信噪比的不断增加,基于LDPC码的SC-FDE系统相对于基于Turbo码的SC-FDE系统的编码增益也在不断增加,由图4可知,在地空信道中,当误码率为 10^{-5} 时LDPC编码系统相比Turbo编码系统有接近1.5 dB的增益。由图5可知,在空空信道中,在信噪比是15 dB时,不编码的SC-FDE系统的误码率大于 10^{-3} ,效果极差,而此时基于Turbo编码的SC-FDE系统的误码率是 10^{-5} ,基于LDPC编码的SC-FDE系统的误码率则小于 10^{-6} ,但当误码率为 10^{-5} 时LDPC编码系统比Turbo编码系统有约2.2 dB的增益。

综上可知,基于编码技术的SC-FDE系统显著地降低了误码率,在硬件实现方面,Turbo译码采用迭代译码算法,不能实现并行运算,而LDPC译码则相对简单,可实现完全的并行操作,方便硬件实现。

3 结束语

本研究简要地介绍了LDPC码和Turbo码的编译码原理,并对基于两种编码的SC-FDE系统进行建模、仿真。仿真及研究结果表明:经Turbo编码和LDPC编码后SC-FDE系统的误码率较之前显著降低,且LDPC码和Turbo码有很强的抗衰落能力,因此编码技术用于无线通信系统可很大程度地提高系统的性能。与基于Turbo码的SC-FDE系统相比,基于LDPC码的SC-FDE系统不仅可以在较低的信噪比下达到理想的误码率且没有差错平底特性,在达到相同误码率时有较大的信道增益,同时LDPC译码复杂度比Turbo码明显降低因而适合硬件实现,因此LDPC码比Turbo码更实用,必将在未来无线移动通信领域得到广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] 王 竞. 单载波频域均衡SC/FDE与多载波OFDM的性能比较[D]. 上海:同济大学电子信息工程学院,2007.
- [2] MACKAY D J C. Good error-correcting codes based on

very sparse matrices[J]. **IEEE Transaction in Information Theory**, 1999, 45(7):399-431.

- [3] 王伟祥,刘玉君. 基于LDPC码编码方案的OFDM系统[J]. 计算机工程与应用,2006,30(6):137-139.
- [4] GLAVIEUX B C. A near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes [J]. **IEEE Transactions on Communications**, 1996, 44(10):1261-1271.
- [5] 郭 忱. LDPC编译码算法的研究和应用[D]. 长春:吉林大学通信工程学院,2007.
- [6] 刘顺兰,刘婷婷,曾 嵘,等. 改进的单载波频域均衡系统及其在航空信道上的性能分析[J]. 电讯技术,2009,49(9):49-53.
- [7] 陈 艳,赵旦峰,高敬鹏. OFDM系统下LDPC码的性能仿真[J]. 舰船电子对抗,2007,30(4):96-98.
- [8] 王万良,张美燕. 基于turbo码的对称式分布式信源编码研究[J]. 机电工程,2009,26(3):20-33,104.
- [9] 李艳中,赵泽茂. 基于turbo码的PCM/FM再入遥测系统性能分析[J]. 机电工程,2009,26(12):54-57.
- [10] 刘顺兰,刘小云,刘婷婷. 基于Turbo信道编码的SC-FDE系统[J]. 计算机工程,2010,36(7):270-272.

[编辑:李 辉]

(上接第575页)

- [3] ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2004, 19(1):620-628.
- [4] SHAW J J, BERTSEKAS D P. Optimal scheduling of large hydrothermal power system [J]. **IEEE Transactions on PAS**, 1985, 104(2):286-294.
- [5] SIMOPOULOS D N, KAVATZA S D, VOURNAS C D. Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21(1):68-76.
- [6] SIMON S P, PADHY N P, ANAND R S. An ant colony system approach for unit commitment problem [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 28(5):315-323.
- [7] 高 山,单渊达. 遗传算法搜索优化及其在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(3):45-48.
- [8] TING T O, RAO M V C, LOO C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21(1):411-418.
- [9] MANTAWY A H, ABDEL M Y L, SELIM S Z. Unit commitment by tabu search[J]. **IEEE Proceedings Generation, Transactions and Distribution**, 1998, 145(1):56-64.
- [10] 王 剑,刘天琪. 发动机机组组合的混合蚁群优化算法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):85-89.
- [11] 郝晋,石立宝,周家启,等. 一种求解最优机组组合问题的随机扰动蚁群优化算法[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):1-6.
- [12] HOU Yun-he, WU Yao-wu. Generalized ant colony optimization for economic dispatch of power systems [J]. **Power System Technology**, 2002(1):225-229.
- [13] 陈根军,王 磊,唐国庆,等. 基于蚁群最优的配电网规划方法. 电网技术,2003,27(3):71-75.
- [14] MIDDENDORF M, REISCHLE F, SCHMECK H, et al. Multi colony ant algorithms [J]. **Journal of Heuristics**, 2002, 8(3):305-320.
- [15] 顾军华,范培培,宋庆增,等. 改进的求解TSP问题文化蚁群优化方法[J]. 计算机工程与应用,2010,46(26):49-52.
- [16] MA M, SHAHIDEHPUR H M. Transmission-constrained unit commitment based on benders decomposition [J]. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 1998, 20(4):287-294.

[编辑:李 辉]