

自适应频域判决 - 反馈迫零均衡的 OFDM 系统*

李 峰^{1,2}, 苏爱国³, 吴茂初³, 张 琳¹

- (1. 中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275;
2. 中国电信股份有限公司广州分公司无线网络维护中心, 广东 广州 510620;
3. 中国网络通信集团公司东莞市分公司, 广东 东莞 523012)

摘 要: 提出了自适应频域判决 - 反馈迫零均衡的 OFDM 系统。在接收端引入判决 - 反馈迫零均衡, 并对承受严重衰落的子载波信号进行频域交织和前向纠错, 使得各子载波具有相近的信噪比, 从而对所有子载波采用相同的调制编码方式。因此, 系统复杂性比自适应比特加载 OFDM 系统显著降低。将所提方案用于 IEEE802.16d Wireless - MAN OFDM 系统, 多径瑞利衰落信道下的仿真结果表明, 该方案可以有效抵抗频率选择性衰落。

关键词: 前向纠错; 交织; 频域均衡; OFDM; 802.16d

中图分类号: TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 04-0039-04

IEEE 802.16d 是 IEEE 802.16 工作组于 2004 年发布的一个协议标准, 类属固定宽带无线接入系统^[1]。该标准描述了无线城域网空中接口规范, 定义了支持多种业务类型的 MAC 层和相应的多个物理层规范。Wireless - MAN OFDM 系统因其能提供高数据传输速率而受到了广泛的关注, 是目前的研究热点之一。

正交频分复用 (OFDM) 系统通过多个子载波同时传输, 提高了数据传输速率。但在无线移动通信中, OFDM 不同频率分量的子载波承受不同程度的衰落。为此, 可采用自适应的比特加载算法, 根据各个子载波的信道衰落情况分配适当的比特^[2-10], 以对抗子载波间的频率选择性衰落。然而, 这类自适应算法通常处理比较复杂, 开销较大, 在无线环境下的应用受到限制。文献 [2-10] 均假设发送端 OFDM 各子载波等功率发送, 接收端则采用简单的迫零均衡, OFDM 不同子载波具有不同的信噪比, 因此需采用自适应的调制编码技术, 系统复杂度高。

均衡可分为迫零均衡和判决 - 反馈迫零均衡。前者均衡后信号的信噪比和衰落系数有关, 后者均衡后信号的信噪比与衰落系数无关^[11]。本文提出将频域判决 - 反馈迫零均衡用于无线环境下的 OFDM 系统。理想信道中, 均衡后 OFDM 子载波的信噪比相同, OFDM 各个子载波的信道容量趋于一致, 从而可以对所有子载波进行统一的处理, 比如

采用相同的编码、调制方式, 不再需要根据各个子载波的衰落情况采用复杂的自适应比特分配算法, 从而显著降低系统的复杂度。

然而, 当无线信道中某个子载波传输的信号受到严重衰落时, 判决 - 反馈迫零均衡的结果误差较大。频域交织可以在 OFDM 衰落不同的子信道上均匀分配发送比特, 与纠错编码结合, 可显著降低某个衰落严重的子载波的影响, 提升 OFDM 系统的整体误比特率性能^[12]。上述由于均衡不理想造成的影响可以由编码和交织得到改善。

因此, 本文提出一种结合编码、交织和自适应频域判决 - 反馈均衡的 OFDM 系统。通过在接收端引入判决 - 反馈均衡, 将 OFDM 大多数子载波的信噪比恢复到系统平均信噪比的水平; 少量由于衰落特别严重而不能恢复的子载波上产生的错误比特, 则通过频域交织和纠错编码来进行处理。本文将所提方案用于 IEEE 802.16d Wireless - MAN OFDM 系统, 并基于协议描述的信道编码和交织方法和多径瑞利衰落信道, 对方案进行了仿真验证。

1 自适应频域均衡 OFDM 系统

在 L 条独立多径衰落信道下, 接收到的离散 OFDM 信号可以表示为:

$$r_k = \sum_{l=0}^L h_l s_{k-l} + n_k \quad (1)$$

* 收稿日期: 2007-12-18

基金项目: 国家自然科学基金和广东省联合基金资助项目 (U0635003); 广东省科技攻关资助项目 (2005B10101001); 东莞市科技计划资助项目 (东科 [2007] 1-28); 广州市科技攻关资助项目

作者简介: 李峰 (1983 年生), 男, 硕士; 通讯联系人: 张琳; E-mail: isszl@mail.sysu.edu.cn.

其中: r_k 为接收信号, h_l 为第 l 条径的时域信道衰落系数, 服从瑞利分布, s_{k-l} 为时域发送信号, n_k 为加性高斯白噪声。假设系统为理想的 OFDM 系统, 不考虑符号间干扰 (ISI) 和子载波间干扰 (ICI)。将式 (1) 写成频域的形式。OFDM 子载波数为 N , 假设频域每个子载波上发送信号分别为 X_n , $n=0, \dots, N-1$, 则接收端第 n 个子载波上的接收信号可以表示为:

$$Y_n = H_n X_n + N_n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中 H_n 为第 n 个子载波上的信道频域冲激响应, N_n 为等效到频域的方差为 N_0 的复加性高斯白噪声。利用多径时延抽头线模型, H_n 可表示为:

$$H_n = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \exp(-j2\pi \frac{nl}{N}) \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

通常 OFDM 各个子载波上发送信号功率相等, 系统的信噪比定义为:

$$\text{SNR} = \overline{X_n^2} / N_0 \quad (4)$$

其中 $\overline{X_n^2}$ 是 X_n^2 的均值。

经过频域迫零均衡后的信号为:

$$Y'_n = Y_n / H_n = X_n + N_n / H_n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

第 n 个子载波的瞬时信噪比为:

$$\gamma_n = |H_n|^2 \text{SNR} \quad n=0, \dots, N-1 \quad (6)$$

从 (6) 式中可知各子载波的误比特率由瞬时信噪比 (即乘性信道因子) 决定, 因此各子载波的误比特率差别很大, 整个系统的误比特率主要由那些处于深衰落的子载波决定。

假设对 (5) 式的信号进行判决, 判决的信号为 $\hat{X}_n$, 则经过频域判决-反馈迫零均衡后的信号为:

$$Y'_n = Y_n - \hat{X}_n (H_n - 1) = (X_n - \hat{X}_n) H_n + \hat{X}_n + N_n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

当 $\hat{X}_n$ 为正确判决的信号, 即 $\hat{X}_n = X_n$ 时,

$$Y'_n = \hat{X}_n + N_n = X_n + N_n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

第 n 个子载波的瞬时信噪比为:

$$\gamma_n = \text{SNR} \quad n=0, \dots, N-1 \quad (9)$$

因此, 判决-反馈迫零均衡后的信噪比与信道衰落幅度无关。

对于 (5)、(7) 式在实际应用中可采取两种处理方式: 一是利用已经成熟的各种均衡算法来进行均衡处理, 如 LMS 算法、RLS 算法等; 二是先利用信道估计算法得到信道冲激响应 H_n 。

图 1 是对采用频域迫零均衡和频域判决-反馈迫零均衡两种不同方式的 OFDM 系统的仿真结果。OFDM 子载波数为 256, 循环前缀长度为 8, 采用 16QAM 调制方式, 系统平均信噪比为 20 dB。ZFE1 为采用频域 LMS 均衡算法。DFE1 是对初步的均衡结果进行判决 (最小欧氏距离判决), 再将判决后的信号反馈回去, 这里判决信号有可能是错误的。ZFE2 和 DFE2 为理想的迫零均衡 (H_n 已知) 和理想的判决反馈均衡 (H_n 已知, 且判决信号完全正确)。判决-反馈迫零均衡在子载波的信道衰落严重的情况下, 由于判决不理想, 不能将子载波的信噪比恢复到系统平均信噪比的水平, 系统的误比特将主要在这些信道衰落严重的子载波上产生。

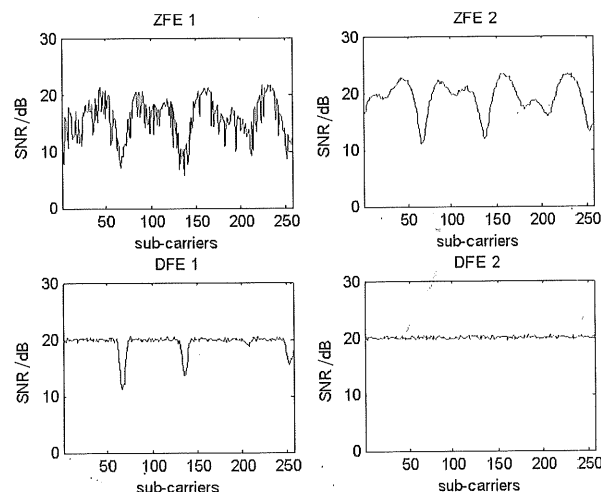


图 1 频域均衡 OFDM 子载波 SNR

Fig. 1 The SNR of OFDM sub-carriers after frequency-domain equalization

2 结合编码、交织和自适应频域判决-反馈迫零均衡的 Wireless-MAN OFDM 系统

如前所述, 理想判决时, 自适应判决-反馈迫零均衡后的信噪比与信道衰落幅度无关。然而, 若接收端的判决不理想, 则承受严重衰落的子载波信噪比难以恢复为系统平均信噪比。为此, 我们将发送前的比特数据先进行纠错编码, 再通过频域交织将编码后的比特在各个子载波上均匀分布, 则在少数衰落严重的子载波上产生的误比特将可以在解码时得到有效的纠正, 从而弥补判决-反馈迫零均衡的不足。

将编码、交织与自适应判决-反馈迫零均衡结合, 并用于 IEEE 802.16d Wireless-MAN 协议规范, 可得 OFDM 系统如图 2 所示:

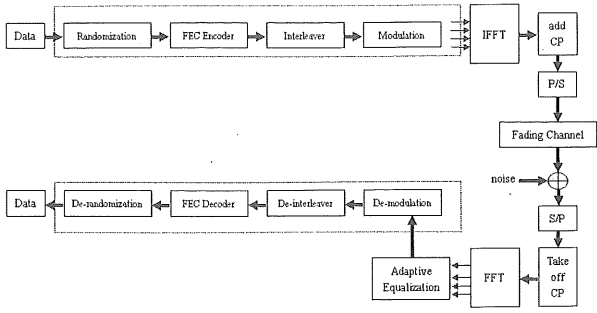


图2 自适应频域均衡 Wireless-MAN OFDM 系统

Fig. 2 Wireless-MAN OFDM system using adaptive frequency-domain equalization

根据协议规定, OFDM 共有 256 个子载波, 其中 56 个子载波是不传输任何数据, 剩下的 200 个子载波中 8 个子载波用来传输导频信号, 其余 192 个子载波用来传输数据。这 192 个子载波进行了子带划分, 同一个子带的所有子载波采用相同的编码和调制方式, 子带数可以是 1, 2, 4, 8, 16。最多是由 192 个子载波全部组成一个子带, 总共 1 个子带。最少是由 12 个子载波组成一个子带, 共有 16 个子带。

在 802.16d 协议中, 前向纠错编码是由 Reed-Solomon (RS) 码和卷积码级联构成, RS 作为外码, 卷积码作为内码, 协议中详细规定了不同的码率。调制方式有 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 四种可供选择。这些调制方式的星座图需要乘上一个归一化因子 c 来使得各种调制信号达到相同的平均功率。对上述四种调制方式, c 分别等于 1 、 $1/\sqrt{2}$ 、 $1/\sqrt{10}$ 、 $1/\sqrt{42}$ 。

编码后的数据在调制之前进行交织, 在协议中规定要进行两次交织, 第一次交织把编码后相邻的比特映射到不同子载波, 第二次交织把第一次交织后相邻的比特映射到星座图上不同的星座点上。令 N_{cpc} 为每个子载波中一个符号要传输的比特数, 对 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 来说, N_{cpc} 分别为 1、2、4、6。令 $s = \text{ceil}(N_{\text{cpc}}/2)$, N_{cbps} 为交织器的长度, 对不同调制方式和不同的子带数, N_{cbps} 是不同的 (具体数值可参见协议)。

设 m_k 为第一次交织前的各比特序号, j_k 为第二次交织后, 调制之前的比特序号。则第一次的交织方程为:

$$m_k = (N_{\text{cbps}}/12) \cdot k_{\text{mod } 12} + \text{floor}(k/12) \quad k = 0, 1, \dots, N_{\text{cbps}} - 1 \quad (10)$$

第二次的交织方程为:

$$j_k = s \cdot \text{floor}(m_k/s) + (m_k + N_{\text{cbps}} - \text{floor}(12 \cdot m_k/N_{\text{cbps}}))_{\text{mod}(s)} \quad k = 0, 1, \dots, N_{\text{cbps}} - 1 \quad (11)$$

同样, 解交织时也分两步进行。令 j 为解调后, 为解交织之前的各比特序号, m_j 为第一次解交织后, 第二次解交织前的比特序号, k_j 为第二次解交织后的比特序号。则第一次解交织的方程为:

$$m_j = s \cdot \text{floor}(j/s) + (j + \text{floor}(12 \cdot j/N_{\text{cbps}}))_{\text{mod}(s)} \quad j = 0, 1, \dots, N_{\text{cbps}} - 1 \quad (12)$$

第二次解交织方程为:

$$k_j = 12 \cdot m_j - (N_{\text{cbps}} - 1) \cdot \text{floor}(12 \cdot m_j/N_{\text{cbps}}) \quad j = 0, 1, \dots, N_{\text{cbps}} - 1 \quad (13)$$

3 仿真结果及分析

多径衰落信道采用文献 [13] 所建议的 6 个 SUI 信道模型中的第四个 (SUI-4) 信道。SUI-4 由三条独立多径构成, 时延分别为 0、1.5、4 μs , 每条径的功率分别为 0、-4、-8 dB。保证 90% 覆盖时每条径的 K 因子 (莱斯因子) 分别为: 0、0、0 dB。每条径的多普勒频移分别为: 0.2、0.15、0.25 Hz。功率归一化因子 $F_{\text{omni}} = -1.921$ dB, 均方根延迟扩展为 $\tau_{\text{RMS}} = 1.257 \mu\text{s}$ 。IEEE 802.16d 协议中 OFDM 可以采用不同长度的循环前缀, 为保持时延长度不超过循环前缀的长度, 仿真时选择循环前缀长度为 64。在仿真时假设 OFDM 信号经历块衰落。

自适应频域判决-反馈迫零均衡 Wireless-OFDM 系统在 802.16d 协议规定的 16QAM 1/2 码率下的 BER 性能曲线如图 3 所示。除协议中规定的几种子带划分方式外, 作为比较, 还分别画出了未进行交织时在多径衰落信道和 AWGN 信道下系统的 BER 曲线。如图所示, 结合编码和交织的自适应频域判决-反馈均衡 OFDM 系统能够有效地抵抗多径造成的频率选择性衰落。

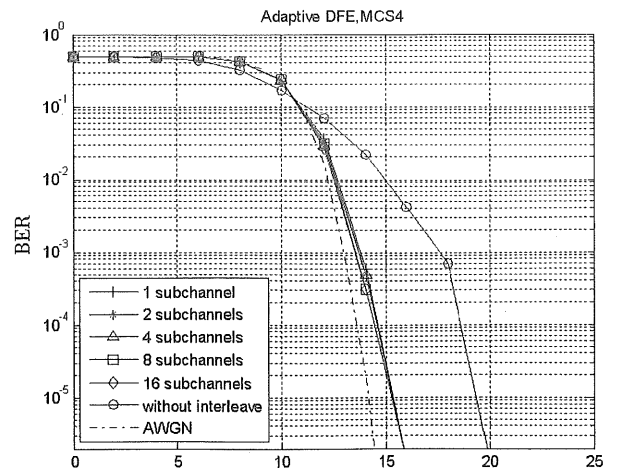


图3 16QAM 1/2 码率下系统的 BER

Fig. 3 System BER under 16QAM 1/2 code rate

4 结 语

本文将频域判决-反馈均衡用于 OFDM 系统,并结合编码、交织,使得 OFDM 子载波信号具有相近的信噪比,以便对子载波采用相同的调制编码。与自适应比特加载算法相比,该方案不需对不同子载波采用不同的调制编码技术进行处理,从而降低了系统的复杂度。在 IEEE 802.16d Wireless-MAN OFDM 系统中的仿真结果表明:结合编码和交织的自适应频域判决-反馈均衡 OFDM 系统能够有效地抵抗多径造成的频率选择性衰落。

参考文献:

- [1] IEEE Std 802.16TM - 2004. Air interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S]. October, 2004.
- [2] CHOW, Peter S, CIOFFO John M, BINGHAM John A. C. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2/3/4):773-775.
- [3] HARTOGS Hughes. Ensemble modem structure for imperfect transmission media [P]. U. S. Patents Nos. 4679227 (July 1987), 4731846 (March 1988) and 4833706 (May 1989).
- [4] FISCHER R F H, HUBER J B. A new loading algorithm for discrete multitone transmission[C]. IEEE Proc Globecom, 1996.
- [5] LI Zhen, SONG Junde, SONG Mei. Link adaptation of wideband OFDM systems in multi-path fading channel [C]. Proceeding of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, IEEE, 2002.
- [6] GRUNHEID Rainer, BOLINTH Edgar, ROHLING Prof. Dr. Hermann. A blockwise loading algorithm for the adaptive modulation technique in OFDM systems [C]. IEEE, 2001.
- [7] LAI S K, CHENG R S, LETAIEF K B. Adaptive trellis coded MQAM and power optimization for OFDM transmission [C]. IEEE, 1999.
- [8] WONG C Y, CHENG R S. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1999, 17(10):1.
- [9] RHEE W J, CIOFFI J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation [C]. IEEE, 2000.
- [10] DAS S, VISWANATHAN H. Dynamic power and sub-carrier assignment in a multi-user OFDM system [C]. IEEE, 2004.
- [11] FORNEY Jr G D, EYUBOGLU M V. Combined equalization and coding using precoding [J]. IEEE Communications Magazine, 1991, 12:28-30.
- [12] LEI S W, LAU V K N. Performance analysis of adaptive interleaving for OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(3):435-443.
- [13] IEEE 802.16.3c-01/29r4. Channel models for fixed wireless applications [R]. 2001:17.

An Adaptive Frequency-domain Zero-forcing Decision-feedback Equalization OFDM System

LI Feng^{1,2}, SU Ai-guo², WU Mao-chu³, ZHANG Ling¹

- (1. Department of Electronic and Communication Engineering, Sun Yet-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Wireless Network Maintenance Center, GuangZhou Branch Office, China Telcom, Guangzhou 510620, China;
3. Dongguan Branch Office, China Netcom, Dongguan 523012, China)

Abstract: An adaptive frequency-domain zero-forcing decision-feedback equalization OFDM system is proposed by introducing a zero-forcing decision-feedback equalizer in the receiver. With using frequency-domain interleaving as long as FEC coding, most of the sub-carriers' SNR can be recovered to the average level. Thus, the same modulation scheme can be used for all of the sub-carriers, the complexity is reduced and much lower than that of adaptive bit loading OFDM systems. The proposed scheme is applied to IEEE802.16d Wireless-MAN OFDM system. The simulations results under multi-path Rayleigh fading channel demonstrate that the new scheme can effectively overcome frequency-selective fading.

Key words: FEC coding; interleaving; frequency-domain equalization; OFDM; 802.16d