

OFDM 系统中基于有限反馈的余量自适应比特加载*

张广驰^{1,2}, 江艳敏², 秦家银²

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州, 510006;

2. 中山大学电子与通信工程系, 广东 广州, 510275)

摘 要: 提出基于有限反馈的 OFDM 系统余量自适应比特加载策略。该策略可以用于上下行信道增益不相同、接收端到发送端的反馈速率有限的 OFDM 系统中。在该策略中, 发送端可以使用的比特加载向量被限制在一个有限长的比特加载表中, 接收端根据信道状态信息从表中选择最适合的比特加载向量, 并把该向量在表中的序号反馈回发送端。发送端根据收到的序号选择相应的比特加载向量。使用 Lloyd 算法和最优的比特加载算法构建比特加载表。仿真结果表明所提出策略在使用较少的反馈比特数的情况下即可达到较好的效果。

关键词: 正交频分复用; 比特加载; 有限反馈; 余量自适应

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 05-0038-04

Margin Adaptive Bit Loading for OFDM Using Limited Feedback

ZHANG Guangchi^{1,2}, JIANG Yanmin², QIN Jiayin²

(1. Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Electronic and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A margin adaptive bit loading scheme is proposed for the orthogonal frequency division multiplexing systems, where channel reciprocity is unavailable and the feedback rate from the receiver to the transmitter is limited. All bit loading vectors for the transmitter are restricted in a bit loading table, which is designed using the Lloyd algorithm. In each fading block, the receiver chooses the bit loading vector from the table according to channel state information, and feeds the chosen result back to the transmitter. Simulation results show that the proposed scheme is effective even with a small number of feedback bits.

Key words: OFDM; bit loading; limited feedback; margin adaptive

OFDM (正交频分复用) 系统被当前和未来的无线通信网广泛采用^[1]。在 OFDM 系统中, 存在信道的频率选择性衰落, 不同子载波的信道增益不同, 因此自适应地在子载波之间分配资源能够有效提升系统性能^[2]。比特加载 (bit loading) 是一种有效的自适应资源分配技术^[3]。通常, 比特加载算法可以分为三类: 消耗功率最小化 (即余量自适应, margin adaptive)^[3-5], 速率最大化 (即速率自适应, rate adaptive) 和差错概率最小化^[3-6]。

使用这些算法都需要发送端知道完全的信道状态信息。

现有的无线通信系统是频分双工 (frequency-division duplex) 的, 未来的无线通信系统仍然可能基于频分双工。在频分双工系统中, 上下行信道增益互不相同, 发送端需要通过接收端的反馈来获得完全的信道状态信息^[7]。完全的信道状态信息要用实数表示, 要使发射机实时地获得准确的信道状态信息, 要求反馈速率非常高, 会占用大量用于

* 收稿日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60672048); 广州市科技计划资助项目 (2008Z1-D151); 国家自然科学基金和广东省联合基金资助项目 (U0635003)

作者简介: 张广驰 (1982 年生), 男, 博士; E-mail: guangchi@gmail.com

传输用户数据的带宽。因此,在实际应用中反馈速率一般是有限的。根据有限速率的反馈来优化通信系统性能逐渐成为研究热点。例如,文献[8-10]分别研究在反馈速率有限的条件下优化 OFDM 系统、MIMO(多输入多输出)系统和 MIMO-OFDM 系统的性能,性能优化方式包括功率分配、发射机设计等。

针对以往比特加载算法需要理想反馈的问题,本文提出一种基于有限速率反馈的 OFDM 系统余量最大化比特加载策略。发送端可以使用的比特加载向量被限制在一个长度有限的比特加载表中,接收端根据信道状态信息从比特加载表中选择相应的比特加载向量,然后通过反馈帮助发送端选择比特加载向量。反馈信息是被选中的比特加载向量在比特加载表中的序号,而不是信道状态信息。该策略复杂度较低,可以实时工作。需要指出的是,我们使用 Lloyd 算法设计比特加载表^[11],这项工作是个离线(offline)过程,在系统开始上线工作之前完成。仿真结果表明;与不需反馈的平均比特分配策略相比,所提策略使用较少的反馈比特数即可得到较大的性能提升;随着反馈比特数增加,该策略的性能趋向于基于完整信道状态信息的最优比特加载策略。

1 系统模型

考虑一个带有 N 个子载波的 OFDM 系统,设信道增益向量为 $H = [H_1, H_2, \dots, H_N]^T$, 其中 H_n 表示第 n 条子载波的信道增益。定义一个向量 $g = [g_1, g_2, \dots, g_N]^T$, 其中 $g_n = |H_n|^2 / \sigma_n^2$, σ_n^2 是第 n 条子载波上的噪声功率,可以把 g 看作当发送端分配单位功率给每个子载波时的信噪比(SNR)向量。令 $b = [b_1, b_2, \dots, b_N]^T$, 表示比特加载向量,其中 b_n 代表分配在第 n 个子载波上的比特数。为保证接收端对 b_n 个比特数据的可靠接收,第 n 个子载波上接收信噪比需为:

$$\gamma_n(b_n) = \rho(2^{b_n} - 1) \quad (1)$$

其中 ρ 表示 SNR 差距(SNR gap),它取决于发送信号使用的调制编码方式^[3]。第 n 个子载波上所需要的发送功率为:

$$P_n(b_n, g_n) = \gamma_n(b_n) / g_n = \rho(2^{b_n} - 1) / g_n \quad (2)$$

在第 n 个子载波上发送 b_n 比特数据的功率增量定义为,在第 n 个子载波上发送 b_n 比特所需功率与发送 $b_n - 1$ 比特所需功率相比的增加量,其数学表达式为:

$$\Delta P_n(b_n, g_n) = P_n(b_n, g_n) - P_n(b_n - 1, g_n) =$$

$$\rho 2^{b_n-1} / g_n \quad (3)$$

在 N 个子载波上所需要的总发送功率为:

$$P_T(b, g) = \sum_{n=1}^N P_n(b_n, g_n) \quad (4)$$

假定信道是块衰落(block fading)的,即信道增益在一个衰落块内保持不变,不同衰落块间的信道增益独立同分布。假定接收端知道信道状态信息 g , 而发送端不知道。接收端根据 g 决定比特加载向量 b , 并通过反馈信道将选定的 b 无差错、无延迟地通知发送端。在每个衰落块中进行一次反馈,反馈比特数为 Q 。 b 的选取范围为势为 2^Q 的比特加载表,该表可以表示为: $\{b_1, b_2, \dots, b_{2^Q}\}$ 。令区域(region) $C_1, C_2, \dots, C_{2^Q}$ 为 g 空间的一个划分,当 $g \in C_i$ 时 b_i 是比特加载表中最适合的比特加载向量。

2 比特加载表的设计

在本节中,我们设计比特加载表,该过程是离线的。设计目标是在每个 OFDM 符号包含 B 比特数据的情况下,最小化总平均发送功率。总平均发送功率表达式为:

$$P_{T,avg} = \sum_{i=1}^{2^Q} (E_{g \in C_i} [P_T(b_i, g)] \cdot Pr[g \in C_i]) \quad (5)$$

其中 $Pr[\text{event } A]$ 表示事件 A 发生的概率。因为比特加载表的设计问题与矢量量化问题类似,所以可以采用 Lloyd 算法来解决^[11]。在使用 Lloyd 算法的过程中,使用总平均发送功率作为失真测度(distortion measure)。重复下面的步骤 1 和步骤 2 直到收敛,可以找到最优的比特加载表。

步骤 1: 根据给定区域划分 $\{C_1, C_2, \dots, C_{2^Q}\}$, 决定最优的比特加载表 $\{b_1, b_2, \dots, b_{2^Q}\}$ 。

步骤 2: 根据给定的比特加载表 $\{b_1, b_2, \dots, b_{2^Q}\}$, 决定最优的区域划分 $\{C_1, C_2, \dots, C_{2^Q}\}$ 。

在步骤 1 中,最优的比特加载向量 b_i 根据最小化失真测度准则确定,即最小化 $g \in C_i$ 时的平均发送功率:

$$b_i = \arg \min_b E_{g \in C_i} [P_T(b, g)] \quad (6)$$

为了求公式(6)的解,我们生成 K 个信道状态信息的样本 $\{g_1, g_2, \dots, g_K\}$, 整个样本空间的第 i 个分区 C_i 写为 $C_i = \{g_1^{(i)}, g_2^{(i)}, \dots, g_{K_i}^{(i)}\}$, 其中 K_i 是该分区的势,且 $g_k^{(i)} = [g_{k,1}^{(i)}, g_{k,2}^{(i)}, \dots, g_{k,N}^{(i)}]^T, k \in \{1, \dots, K_i\}$ 。根据大数定理,算术平均来近似(6)式的统计平均,可以得到求 b_i 的标准:

$$b_i = \arg \min_b \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} P_T(b, g_K^{(i)}) \quad (7)$$

采用 Hughes-Hartog 算法^[4]可以得到最优的 b_i 。在算法中, 每一步给有最小平均功率增量的子载波分配一个比特。算法的描述如下:

(1) $b_{i,n} = 0, n = 1, \dots, N$

(2) While $\sum_{n=1}^N b_{i,n} < B$

(a) $m = \arg \min_{1 \leq n \leq N} \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} \Delta P_n(b_{i,n}, g_{K,n}^{(i)})$

(b) $b_{i,m} = b_{i,m} + 1$

其中 $b_i = [b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,N}]^T$ 。

在步骤 2 中, 根据 (8) 式的最小失真测度准则来划分最优分区:

$$C_i = \{g \mid P_T(b_i, g) \leq P_T(b_j, g), \forall i, j \in [1, \dots, 2^Q], i \neq j\} \quad (8)$$

3 仿真结果

使用计算机仿真来验证所提策略的有效性。在仿真中, OFDM 系统的子载波数 $N = 64$, 传输速率为每个 OFDM 符号 128 比特, 也即 $B = 128$ bits。SNR gap 为 $\rho = 3$ dB, 噪声功率为 $\sigma_n^2 = 1$ W。首先生成时域多径延迟信道, 每个延迟抽头的平均功率相等。然后使用快速傅立叶变换, 得到频域信道增益。仿真比较了本文提出的基于有限反馈的比特加载策略、基于完全信道状态信息反馈的最优比特加载算法^[4], 以及在没有反馈信息时的平均分配比特加载算法。

图 1 显示了不同比特加载策略的平均总发送功率随信道时域延迟抽头数变化的曲线。如图所示, 与没有反馈信息的平均分配比特加载算法相比, 我们提出的基于有限反馈的比特加载策略在只用 $Q = 1$ 比特反馈时已经可以节省相当可观的发送功率。所用的反馈比特数越多, 所需的总发送功率越少, 性能越接近使用完全信道状态信息的比特加载策略。

图 2 是不同比特加载策略的误块率 (block error rate, 简称 BLER) 随每比特信噪比变化的曲线^[12]。这里的误块率也称作中断概率。图中的时域信道延迟抽头数为 16。从图中可见, 只使用很少的反馈比特数, 所提策略能带来性能的提升, 随着反馈比特数增加, 本文提出的策略的误块率性能与基于完全信道状态信息的最优比特加载策略的性能越来越接近。

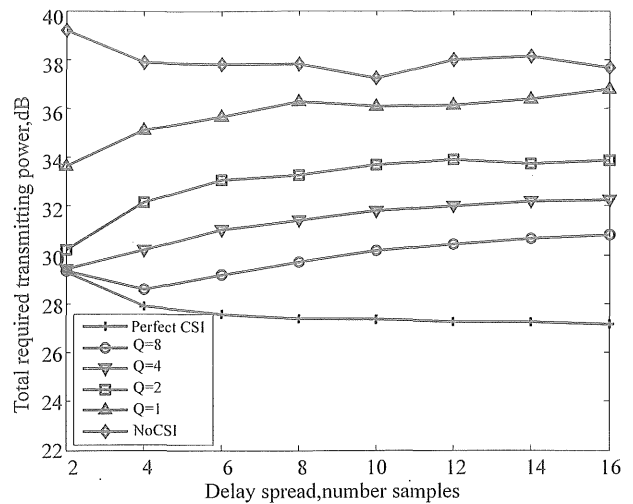


图 1 不同比特加载策略的总平均发送功率随信道时域延迟抽头数变化的曲线

Fig. 1 Average total transmitting power versus delay spread (in terms of number of samples)

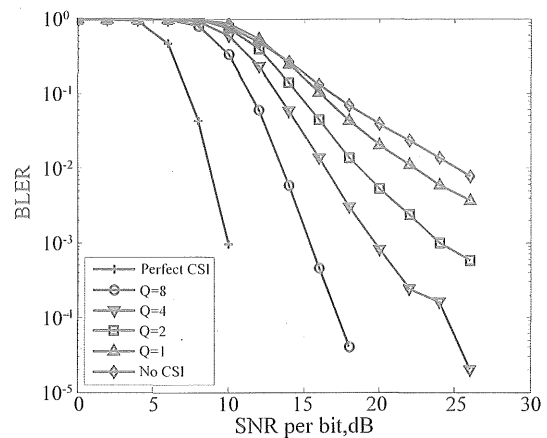


图 2 各种策略的误块率随信噪比变化的曲线

Fig. 2 Block error rate (BLER) versus available SNR per bit

4 讨论

本文为 OFDM 系统提出了基于有限反馈的余量自适应比特加载策略。该策略复杂度低, 能满足系统实时性要求。使用 Lloyd 算法设计了最优的比特加载表。计算机仿真结果显示: 与没有反馈信息的平均比特分配加载算法相比, 所提策略在反馈比特数较小时已能大幅度提高系统的性能, 达到节能的目的; 随着反馈比特数增加, 所提策略的性能逐渐接近于基于完全信道状态信息的最优比特加载算法的性能。

参考文献:

- [1] HANZO L, MUNSTER M, CHOI B J, et al. OFDM and MC-CDMA for broadband multi-user communications, WLANs and broadcasting [M]. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [2] LIU H, LI G. OFDM-based broadband wireless networks: design and optimization [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] STUBER G, LI Y. Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications [M]. Boston, MA: Springer, 2006.
- [4] HUGHES-HARTOGS D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media [P]. U. S.: Telebit Corporation, 1987.
- [5] CAMPello J. Practical bit loading for DMT [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications, 1999. ICC 99. Vancouver, Canada, 1999, 2: 801-805.
- [6] FISCHER R, HUBER J. A new loading algorithm for discrete multitone transmission [C]//Proc of Globecom'96. London, 1996, 724-728.
- [7] CHAN P W C, LO E S, WANG R R, et al. The evolution path of 4G networks: FDD or TDD? [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(12): 42-50.
- [8] LOVE D J, HEATH R W JR. OFDM power loading using limited feedback [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1773-1780.
- [9] LAU V, LIU Y, CHEN T A. On the design of MIMO block-fading channels with feedback-link capacity constraint [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 62-70.
- [10] LAU V K N, WU T. Optimal transmission and limited feedback design for OFDM/MIMO systems in frequency selective block fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1569-1573.
- [11] GERSHO A, GRAY R. Vector quantization and signal compression [M]. Boston: Kluwer, 1992.
- [12] GUI B, CIMINI L J. Bit loading algorithms for cooperative OFDM systems [J/OL]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2008: 9. doi:10.1155/2008/476797
- ZHANG Fang, ZHU Hehua, NING Minxia. Modeling method of 3D strata suitable for massive data [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Sup. 1): 3305-3310.
- [23] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化 [J]. 地质前缘, 2000, 7(增): 271-277.
- LI Peijun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(Sup.): 271-277.
- [24] 王鹏, 江南. 基于核心序列优先的倒转地层构模方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(5): 52-55.
- WANG Peng, JIANG Nan. Modeling Method of Overturned Stratum Based on Core-Sequence First [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(5): 52-55.
- [25] 刘祚秋, 周翠英, 赵旭升, 等. 三维地层模型及可视化技术研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42 (4): 21-23.
- LIU Zuoqiu, ZHOU Cuiying, ZHAO Xusheng, et al. Research on three-dimensional stratum model and its visual technology [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(4): 21-23.
- [26] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 城市三维地层建模中虚拟孔的引入与实现 [J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 26-30.
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, LIU Xiuguo, et al. Introduction and implementation of virtual borehole in the construction of urban 3D strata model [J]. Geo-Information Science, 2004, 20(6): 26-30.
- [27] 朱良峰, 吴信才, 潘信. 三维地层模型误差修正机制及其实现技术 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 268-271.
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, PAN Xin. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 268-271.

(上接第32页)