

MIMO OFDM 系统中基于物理层与链路层的跨层优化设计

衡 伟 冀晓亮

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要: 该文讨论了基于空时编码发射分集正交频分复用(OFDM)系统的跨层传输技术。该技术结合了传统物理层自适应调制和链路层自动请求重发,利用链路层的误包率和信道估计参数计算自适应调制门限,在系统给定时延和误包率约束的基础上最大程度地提高了频谱利用率。仿真结果表明,该算法相比传统物理层自适应传输,在频谱利用率性能上有 1.5dB 以上的增益。但随着最大重传次数的增加频谱利用率的提高越来越小,这就使得实际系统能以较小的时延代价换取足够的频谱利用率增益。

关键词: OFDM; MIMO(多输入多输出系统); 跨层设计; 自适应调制; 空时编码

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1261-03

A Cross-layer Design on Physical Layer and Data Link Layer in MIMO OFDM System

Heng Wei Ji Xiao-liang

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, a cross-layer design in OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) systems with a space-time coded transmit diversity is provided, which combines the use of AM (Adaptive Modulation) at the physical layer and ARQ (Automatic Repeat reQuest protocol) at the data link layer. The packet error rate and channel estimation are used to compute the adaptive threshold in order to maximize spectral efficiency under given delay and error performance constraints. Simulation results show that this cross-layer design has 1.5dB gain in spectral efficiency comparing the traditional adaptive transaction at physical layer. Nevertheless, with the increasing of maximum number of retransmissions, the gain in spectral efficiency decreases, which suggest that enough spectral efficiency gain can be gotten by a desirable delay in practical systems.

Key words: OFDM; MIMO; Cross layer design; Adaptive modulation; STC

1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术由于能够有效地抑制码间干扰(ISI)而成为多径衰落信道环境下传输高速数据的有效调制技术。空时编码将发射信号在空域和时域都引入联合相关,不仅可以同时取得分集增益和编码增益,而且能得到很高的频谱效率。因此将 OFDM 技术与空时编码技术结合可以进一步提高 OFDM 系统在衰落信道中的抗误码性能。

Keller Thomas 等研究了 OFDM 中的自适应调制(AM)技术^[1],根据时变信道的条件选择调制方式,充分利用了各子载波的频率选择性衰落信道信息,提高了系统吞吐率。然而传统的基于分层结构的协议栈只能在相邻的层之间以固定的方式进行通信,现有的协议栈就无法灵活地适应无线移动环境的变化,设计协议栈时只能考虑其在通信条件最为恶劣的情况下进行工作,从而导致了协议栈无法对有限的频谱资源进行有效的利用。Van Der Schaar 提出各层之间的联合

优化即通过在协议栈的各层之间传递特定的信息来协调协议栈各层之间的工作过程,可以带来很大的性能提高^[2]。Liu Qingwen 等将物理层的自适应调制编码(AMC)与链路层的自动请求重发技术(ARQ)结合,提出了物理层和链路层的联合优化机制^[3]。本文将自适应调制与自动请求重发结合并应用于 MIMO OFDM 系统,以链路层误包率指标控制子载波调制方式选择。

2 系统描述

图 1 为跨层自适应的 MIMO OFDM 系统结构图。来自高层的数据包经过 CRC 编码后进入发送缓冲,按照反馈(图中虚线所示代表反馈信道)得到的调制方式参数对每个子载波进行自适应调制,然后调制数据经过 2 发空时分组码(STBC)和 OFDM 调制后由 2 根发射天线送出。接收方先进行 OFDM 解调,然后对 2 根天线接收到数据进行最大比合并,最大似然译码(ML)后将结果存入接收缓冲。若数据包的 CRC 校验正确,则向发送方反馈一个确认消息(ACK),发送方继续下一个数据包的发送,否则反馈一个错误消息(NAK),发送方将重新发送这个数据包直到接收方正确接收

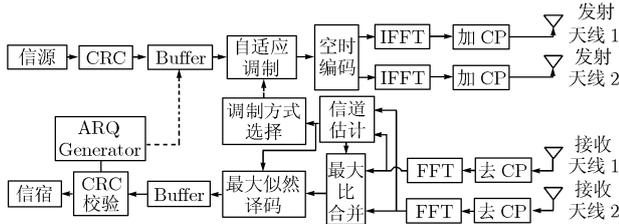


图 1 系统结构图

或达到最大重发次数为止。

本文采用的是 2 发 2 收的 Alamouti 空时编码。取两个连续的调制符号 x_1 和 x_2 为一个分组，根据如下编码矩阵将他们映射到发射天线：

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

3 跨层自适应算法描述

实际系统的时延必须是有限的，因此定义最大重传次数为 N_{\max} 。当重传次数达到 N_{\max} 数据包仍不能正确接收，则丢弃。定义系统所允许的误包率不高于 P_{loss} 。设物理层瞬时误包率不大于 P_0 ，则经过 N_{\max} 次重传之后的链路层误包率应满足：

$$P_0^{N_{\max}+1} \leq P_{\text{loss}} \quad (2)$$

推出：

$$P_0 \leq P_{\text{loss}}^{\frac{1}{N_{\max}+1}} = P_{\text{target}} \quad (3)$$

为了简化分析引用以下误包率近似公式^[5]：

$$\text{PER}_n(\gamma) \approx \begin{cases} 1, & 0 < \gamma < \gamma_{pn} \\ a_n \exp(-g_n \gamma_b), & \gamma \geq \gamma_{pn} \end{cases} \quad (4)$$

其中 n 是 MCS 标识， γ 是接收信噪比。 a_n ， g_n ， γ_{pn} 是模式独立的。

本文考虑了 N ($N = 5$) 种传输模式：不传输，BPSK，QPSK，16QAM 和 64QAM，记做 MCS1，MCS2，MCS3，MCS4 和 MCS5。整个 SNR 区间被分为 $N + 1$ 个连续的部分，分界点记为 $\{\gamma_n\}_{n=0}^{N+1}$ 。当子载波的信噪比 γ 满足 $\gamma \in [\gamma_n, \gamma_{n+1})$ ，则按照模式 n 传输。

定义分界点 γ_n 为传输模式 n 下要达到瞬时误包率目标值 P_{target} 的最小信噪比，通过变换式(4)可求出：

$$\begin{cases} \gamma_0 = 0 \\ \gamma_n = \frac{1}{g_n} \ln \left(\frac{a_n}{P_{\text{target}}} \right), n = 1, 2, \dots, N \\ \gamma_{N+1} = +\infty \end{cases} \quad (5)$$

表 1 为分组包长度 $N_p = 1080$ 时通过最小平方误差估计得到对应的每种调制方式的 a_n ， g_n ， γ_{pn} ^[6]。

总结上述分析，在文献[1]的基础上可以得到 OFDM 系统中跨层自适应算法的实现步骤：

(1) 根据系统所允许的最大时延确定最大重传次数 N_{\max} 。

表 1 未编码 M-QAM 调制传输模式

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
调制方式	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
速率 (bit/sym.)	1	2	4	6
a_n	107.95	109.06	85.01	67.46
g_n	1.0224	0.51117	0.1025	0.0244
γ_{pn}	6.33	9.39	16.09	22.03

(2) 根据系统所要求达到的误包率，利用式(3)得到瞬时误包率的目标值 P_{target} 。

(3) 利用式(5)求出各种调制方式的信噪比分界点。

(4) 以帧为单位在每个子载波上进行自适应调制。

(5) 对接收到的数据包进行 CRC 校验，正确则进行下个数据包的发送，错误则重传直到正确接收或达到最大重传次数 N_{\max} 。

4 性能仿真和分析

仿真使用的是 COST207 信道中的典型城市地区模型，其 6 径的最大延时为 $5 \mu\text{s}$ ，带宽为 20MHz 等分为 1024 个子载波，移动速度为 30km/h。时域上每个 OFDM 符号长度为 0.056ms，一个子帧包含 6 个 OFDM 符号。接收端为理想信道估计和同步，链路层采用停等式 ARQ。设定系统残余误包率为 0.01，包长 1080bit。

图 2 给出了链路层 ARQ 参数 N_{\max} 不同时的跨层自适应传输算法的平均频谱利用率性能曲线，横坐标为每根天线的平均接收信噪比， $N_{\max} = 0$ 对应于不进行出错重传，即单纯物理层自适应传输。由图可知，无论是跨层自适应还是单纯物理层自适应的频谱利用率都随着信噪比的增加而增加，并趋近于所选传输方式能达到的最大值；基于跨层设计的自适应算法相比后者频谱利用率性能有了很大的提高，当频谱利用率相同时，信噪比增益在 1.5 个 dB 以上，而与实际跨层参数不适应的单纯物理层自适应算法将损失相应的性能。同时，频谱利用率随着 N_{\max} 取值的增加而增加，但当 N_{\max} 大于 1 后， N_{\max} 取值的增加所带来的频谱利用率的提高越来越小。仿真结果指出，系统的最大重传次数不需要很大，小次数的重传已经带来了足够的频谱利用率的提高。这就为系统带来了较低的时延和只需要较小的数据缓存区。

图 3 所示为 N_{\max} 取值不同时跨层自适应传输算法首次误包率随信噪比的变化曲线。由图可知，随着 N_{\max} 取值的增加，ARQ 系统的纠错能力会越来越强，这种链路层协议带来的性能提高降低了物理层传输对差错率的要求，因而可以用更高阶的调制方式传输，这就解释了为什么频谱利用率随着 N_{\max} 取值的增加而增加。

5 结束语

本文讨论了 MIMO OFDM 系统中的跨层自适应传输算

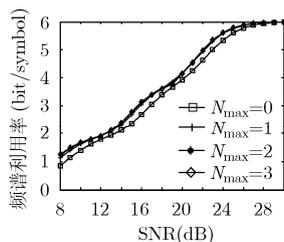


图 2 跨层自适应频谱性能

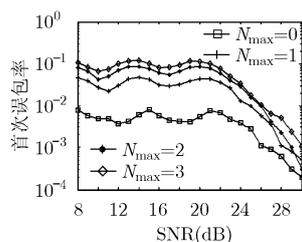


图 3 首次误包率性能

法, 该算法将物理层自适应调制技术与链路层自动请求重发协议相结合, 在系统给定延时和误包率约束的基础上最大程度地提高频谱利用率。仿真表明, 该算法相比传统物理层自适应传输算法, 在频谱利用率性能上有 1.5dB 以上的增益。但随着最大重传次数的增加频谱利用率的提高越来越小, 这就使得实际系统能以较小的时延代价换取足够的频谱利用率增益。

参 考 文 献

[1] Keller Thomas and Hanzo Lajos. Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2000, 49(5): 1893-1906.

- [2] Van Der Schaar and Sai Shankar M N. Cross-layer wireless multimedia transmission: challenges, principles, and new paradigms. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(4): 50-58.
- [3] Liu Qingwen and Zhou Shengli. Cross-Layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1746-1755.
- [4] Vucetic Branka, Yuan Jinhong, 王晓海译. 空时编码技术. 北京: 机械工业出版社, 2004: 80-83.
- [5] Alouini M S and Goldsmith A J. Adaptive modulation over Nakagami fading channels. *Kluwer J. Wireless Communications*, 2000, 13(1-2): 119-143.
- [6] Maaref Amine and Aissa Sonia. A cross-layer design for mimo rayleigh fading channels. *Electrical and Computer Engineering*, 2004, 4(2-5): 2247-2250.

衡 伟: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新一代移动通信系统及其关键技术、通信工程中的信号处理方法、多维信号处理理论及其实现技术。

冀晓亮: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为新一代移动通信系统及其关键技术。