

非精确信道信息下的自适应 MIMO-OFDM 系统性能分析

王永学 陈芳炯 韦岗
(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)

摘要 由于自适应多入多出正交频分复用系统(MIMO-OFDM)可以大大提高系统的频谱效率, 已经成为人们研究的热点, 该文分析并讨论了自适应 MIMO-OFDM 系统中导致非精确信道信息的两个主要因素——信道估计误差和信道信息时延对系统的频谱效率和误码率性能的影响。仿真结果表明, 在 2×2 MIMO-OFDM 系统中, 当信道估计误差小于 -12dB 时, 系统频谱效率损失很小。此外信道预测可以大大降低系统对信道信息时延的敏感程度。

关键词 正交频分复用, 自适应, 多入多出, 频谱效率

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)03-0433-04

Performance Analysis of Adaptive MIMO-OFDM System with Imperfect Channel Information

Wang Yong-xue Chen Fang-jiong Wei Gang

(College of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract As adaptive MIMO-OFDM system can greatly improve the spectral efficiency, many people are studying it. The imperfect Channel State Information (CSI), which is caused by two major factors—channel estimation error and CSI delay, and their impacts on the system frequency efficiency are studied. Simulation results show that the spectral efficiency loss due to channel estimation error is relatively small when the channel estimation error is less than -12dB and the system will be less sensitive to CSI delay when channel prediction is used.

Key words OFDM, Adaptive, MIMO, Spectral efficiency

1 引言

由于正交频分复用(OFDM)技术能很好地抑制符号间干扰, 它已经成为下一代移动通信系统的核心技术。自适应调制技术能根据信道的好坏来决定调制方式, 从而充分利用了信道特征, 提高信道的频谱效率^[1,2]。另外, 研究表明, 多入多出(MIMO)系统可在不增加信道带宽和发射功率的条件下成倍地提高信道的容量^[3]。自适应的MIMO-OFDM, 可充分利用OFDM, MIMO和自适应调制技术的优点, 已经得到越来越多的关注^[4-6]。对于自适应MIMO-OFDM的研究, 大多数都是假设发端已知精确的信道信息。本文主要分析并讨论了自适应MIMO-OFDM系统中导致非精确信道信息的两个主要因素——信道估计误差和信道信息时延对系统的频谱效率的影响, 并做了仿真分析。第2节提出了自适应MIMO-OFDM的系统模型; 第3节分别分析了信道估计误差

和信道信息时延对系统性能的影响。最后是本文的结论。

2 系统模型

假设 MIMO-OFDM 系统有 K 个子载波, N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线, 系统框图如图 1 所示:

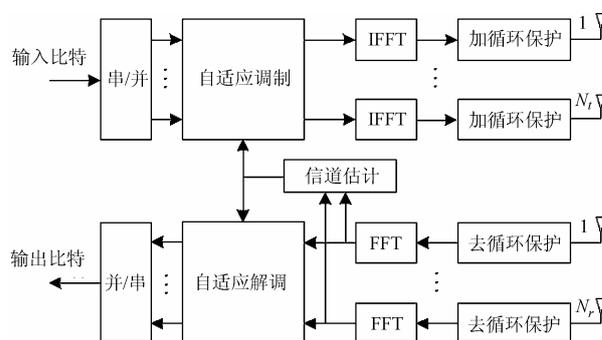


图1 MIMO-OFDM 系统模型

2004-08-13 收到, 2005-03-15 改回

国家自然科学基金(60402014)和广东省自然科学基金(31390)资助课题

为分析简便, 本文以 $N_t = N_r = 2$ 的 MIMO-OFDM 系统为例分析, 设 MIMO-OFDM 系统的频率响应矩阵为

$$\mathbf{H}[n; k] = \begin{pmatrix} H_{11}[n; k] & H_{12}[n; k] \\ H_{21}[n; k] & H_{22}[n; k] \end{pmatrix}, \text{ 其中 } H_{i,j}[n; k] = \alpha_{i,j} e^{-j\theta_{i,j}}$$

为 n 时刻子载波 k 从发送天线 j 到接收天线 i 的频率响应, $\alpha_{i,j}$ 和 $\theta_{i,j}$ 分别为信道幅度增益和相位偏移。设 n 时刻子载波 k 的发送信号矩阵为 $\mathbf{X}[n; k] = \begin{pmatrix} X_1[n; k] \\ X_2[n; k] \end{pmatrix}$, $X_j[n; k]$ 为 n 时刻子载波 k 在发送天线 j 上的发送符号, 则相应的接收信号矩阵可表示为

$$\mathbf{Y}[n; k] = \begin{pmatrix} Y_1[n; k] \\ Y_2[n; k] \end{pmatrix} = \mathbf{H}[n; k] \mathbf{X}[n; k] + \mathbf{W}[n; k] \quad (1)$$

如果采用空时块码技术^[6], 在一个空时块内, 使两根天线在第 n 和 $n+1$ 两个连续符号时间内发送的信号满足 $\begin{pmatrix} X_1[n; k] & X_1[n+1; k] \\ X_2[n; k] & X_2[n+1; k] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1[n; k] & -s_2^*[n; k] \\ s_2[n; k] & s_1^*[n; k] \end{pmatrix}$, *表示复共扼运算, 另外假设 MIMO 信道为准静态信道, 即在一个空时块内信道的频率响应保持不变, $\mathbf{H}[n+1; k] = \mathbf{H}[n; k]$, 由此可得接收端合并后的信号为

$$\tilde{s}_1[n; k] = (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2) s_1[n; k] + n_1 \quad (2)$$

$$\tilde{s}_2[n; k] = (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2) s_2[n; k] + n_2 \quad (3)$$

式中 n_1, n_2 为接收端噪声, 其方差可表示为

$$\text{var}(n_1) = \text{var}(n_2) = (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2) \frac{N_0}{2} \quad (4)$$

其中 N_0 为噪声功率, 为了与 SISO-OFDM 系统比较, 这里我们假设每根天线上的发射信号的功率为 SISO-OFDM 系统发射功率的一半 $E_s/2$, 这样 MIMO-OFDM 系统总的发射功率就与 SISO-OFDM 系统一致, 于是 MIMO-OFDM 系统的信噪比可表示为

$$\begin{aligned} \gamma(n)_{\text{MIMO}} &= \frac{E_s/2}{N_0} (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2) \\ &= \gamma(n)_{\text{SISO}} \frac{\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

从而, MIMO-OFDM 系统就可以等效为一个 SISO-OFDM 系统, 其等效信道幅频增益为

$$|H_{\text{eq}}[n; k]| = \alpha_{\text{eq}} = \sqrt{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2)/2} \quad (6)$$

3 自适应 MIMO-OFDM 系统的误码率和频谱效率

3.1 精确信道信息下的自适应 MIMO-OFDM 系统的误码率和频谱效率

对于理想的自适应 SISO-OFDM 系统的频谱效率, 文献 [2] 做了详细的推导, 结合上一节 $|H_{\text{eq}}[n; k]|$ 的推导, 设 $\beta[n; k]$ 为每个符号可传递的比特数, 于是理想的自适应 MIMO-OFDM 系统的误码率 $P_e[n; k]$ 可表示为

$$P_e[n; k] = 0.2 \exp \left\{ -\frac{1.6(E_s/N_0) |H_{\text{eq}}[n; k]|^2}{2^{\beta[n; k]} - 1} \right\} \quad (7)$$

设 P_{target} 为系统的误码率上限, 从而每个符号可传递的比特数 $\beta[n; k]$ 和系统的平均频谱效率 R 可表示为

$$\beta[n; k] = \log \left\{ \frac{1.6(E_s/N_0) |H_{\text{eq}}[n; k]|^2}{\ln(0.2/P_{\text{target}})} + 1 \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R &= E_{H_{\text{eq}}[1], H_{\text{eq}}[2], \dots, H_{\text{eq}}[K]} \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \beta[n; k] \right\} \\ &= E_{H_{\text{eq}}[k]} \{ \beta[n; k] \} \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 非精确信道信息下的自适应 MIMO-OFDM 系统的误码率和频谱效率

在实际中, 由于信道估计误差和信道信息反馈的时延, 用于估计的信道信息与真实的信道信息之间是存在误差的, 如何在非精确信道信息下获取最大的系统性能是我们关心的主要问题。假设估计的信道信息是 $H'[n; k]$, 而真实的信道信息是 $H[n; k]$, 由于信道的误码率是由 $H[n; k]$ 决定的, 而我们只知道 $H'[n; k]$, 为了衡量系统的误码率性能, 我们定义平均误码率为

$$\bar{P}_e[n; k] = E_{H[n; k] | H'[n; k]} \{ P_e[n; k] \} \quad (10)$$

如果在已知 $H'[n; k]$ 条件下, $H[n; k]$ 的条件概率密度函数已知, 我们就可以计算出系统的平均误码率。设 $H[n; k]$ 的条件概率服从复高斯分布, 其均值为 S , 方差为 σ^2 , 则系统的平均误码率可用式(11)表示, 其中 $a = 1.6\sigma^2(E_s/N_0)$, $b = 1.6|s|^2(E_s/N_0)$ 。

$$\bar{P}_e[n; k] = 0.2 \frac{2^{\beta[n; k]} - 1}{a + (2^{\beta[n; k]} - 1)} \exp \left(-\frac{b}{a + (2^{\beta[n; k]} - 1)} \right) \quad (11)$$

3.2.1 信道估计误差对系统频谱效率的影响 假设发端收到的第 k 个子信道的频率响应的估计值为 $H'_{eq}[n;k]$, 实际的第 k 个子信道的频率响应为 $H_{eq}[n;k]$, 则信道估计误差可用均方差表示为

$$MSE = E \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |H'_{eq}[n;k] - H_{eq}[n;k]|^2 \right\} \quad (12)$$

在 MIMO 系统中, 在已知 $H'_{eq}[n;k]$ 和 MSE 的条件下,

$H_{eq}[n;k]$ 是一个复高斯随机变量, 其均值为 $s_1 = \frac{1}{1+MSE}$

$H'_{eq}[n;k]$, 方差为 $\sigma_1^2 = \frac{MSE}{1+MSE}$ 。图 2 是利用 Jakes 模型仿真

的不同 MSE 条件下 MIMO-OFDM 系统和 SISO-OFDM 系统在目标误码率为 10^{-3} 时的平均频谱效率。分析图 2 可得: (a) 采用 MIMO 技术可以大大提高系统的频谱效率; (b) 信道估计误差 MSE 越大, MIMO-OFDM 系统的频谱效率的损失也越大, 当信道估计误差小于 -12dB 时, MIMO-OFDM 系统由于信道估计误差带来的频谱效率的损失就已经很小了; (c) 相对于 SISO-OFDM 系统, 同样的信道估计误差对 MIMO-OFDM 系统的影响要小很多。

3.2.2 信道信息时延对系统频谱效率的影响 假设当前信道的真实信道频率响应为 $H[n;k]$, τ_D 时刻前的信道频率响应为 $H'[n;k]$, 信道频率响应的相关系数满足 $\rho = J_0(2\pi f_D \tau_D)$, 其中 $J_0(\cdot)$ 表示第一类 0 阶贝塞尔函数, f_D 是最大多普勒频移。可以推导, MIMO-OFDM 系统中, 在已知 $H'_{eq}[n;k]$ 和 MSE 的条件下, $H_{eq}[n;k]$ 是一个复高斯随机变量, 其均值为 $s_2 = \rho H'_{eq}[n;k]$, 方差为 $\sigma_2^2 = 1 - \rho^2$ 。

采用信道预测技术, 可以在保证系统性能的条件下, 大大减少由于信道信息时延带来的系统性能的损失。如果采用前面两个信道估计信息 $H'_{eq}[n;k]$, $H''_{eq}[n;k]$ 来预测当前的信道信息, 则它们的相关系数满足 $\rho_1 = J_0(2\pi f_D \tau_D)$, $\rho_2 = J_0(2\pi f_D 2\tau_D)$, 从而可以推导 $H_{eq}[n;k]$ 的条件概率分布满足均值为 $s_3 = \frac{\rho_1(1-\rho_2)H'_{eq}[n;k] - (\rho_1^2 - \rho_2)H''_{eq}[n;k]}{1-\rho_1^2}$, 方差为 $\sigma_3^2 = \frac{(1-\rho_2)(1+\rho_2-2\rho_1^2)}{1-\rho_1^2}$ 。

图 3 为 MIMO-OFDM 系统和 SISO-OFDM 系统不同信道信息时延时的平均频谱效率, 由图 3 可知, 当 $f_D \tau_D = 0.1$ 时, 系统频谱效率的损失都比较大, 采用信道预测技术后, 系统的频谱效率大大提高。例如, 采用信道预测, $f_D \tau_D = 0.1$ 时的系统频谱效率与不采用信道预测, $f_D \tau_D = 0.05$ 时的系

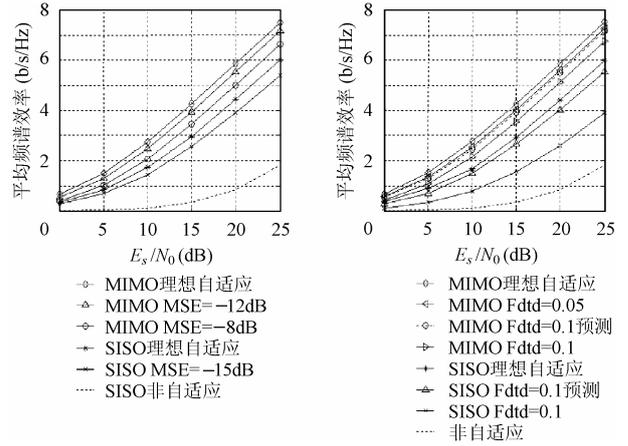


图 2 不同 MSE 下的系统平均频谱效率 ($P_{\text{target}} = 10^{-3}$) 图 3 不同 $f_D \tau_D$ 下的系统平均频谱效率 ($P_{\text{target}} = 10^{-3}$)

统频谱效率基本相同。由此可得, 在 f_D 一定的条件下, 采用信道预测可以大大放宽系统对信道信息时延的要求。另外, 我们还可以发现在同等条件 ($f_D \tau_D = 0.1$) 下, MIMO-OFDM 系统由于信道信息时延带来的性能损失比 SISO-OFDM 系统小得多, 因而采用信道预测后所得改进也相对较小。

综合上述对信道估计误差和信道信息时延对自适应 MIMO-OFDM 系统性能影响的分析, 可以得出如下结论: (a) MIMO 技术可以大大提高系统的频谱效率; (b) MIMO 技术可以减少系统中信道估计误差对系统性能的影响, 在 2×2 MIMO-OFDM 系统中, 当信道估计的均方误差小于 -12dB 时, 信道估计误差带来的系统性能损失就已经很小; (c) MIMO 技术可以减少系统中信道信息时延对系统性能的影响, 在同等条件 ($f_D \tau_D = 0.1$) 下, MIMO-OFDM 系统由于信道信息时延带来的性能损失比 SISO-OFDM 系统小得多; (c) 信道预测可以大大放宽系统对信道信息时延的要求, 但在 MIMO 系统中, 信道预测的效果不如在 SISO 系统中明显。

4 结束语

本文分析并讨论了自适应调制在非精确信道信息下的 MIMO-OFDM 系统中的应用, 以及信道估计误差和信道信息时延带来的信道信息误差对系统性能的影响。仿真结果表明在 2×2 MIMO-OFDM 系统中, 当信道估计的均方误差小于 -12dB 时就可以使信道估计误差带来的系统性能损失很小。另外, 采用信道预测可以大大减少系统性能对信道信息时延的敏感程度, 提高自适应调制的间隔, 从而减少自适应调制需要传输的信令负荷, 提高了系统的频谱效率, 但在 MIMO 系统中, 信道预测的效果不如 SISO 系统明显。

参 考 文 献

- [1] Chung S T, Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: an unified view. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(9): 1561 – 1571.
- [2] Ye Sigen, Blum R S, Cimini Jr L J. Adaptive modulation for variable-rate OFDM system with imperfect channel information. *IEEE 55th Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. Birmingham, 6-9 May, 2002, Vol.2: 767 – 771.*
- [3] Chiurtu N, Rimoldi B, Telatar E. On the capacity of multi-antenna Gaussian channels. *IEEE International Symposium on Information Theory, 2001, Washington, D.C., 24-29 June, 2001: 53 – 53.*
- [4] Gifford S, Kleider J E, Chuprun S. OFDM-MIMO communication systems in a Rayleigh faded environment with imperfect channel estimates. *IEEE Military Communications Conference, 2003. MILCOM 2003. Boston, MA, 13-16 Oct., 2003 Vol.1: 633 – 637.*
- [5] Xia Pengfei, Zhou Shengli, Giannakis G B. Adaptive MIMO-OFDM based on partial channel state information. *IEEE Trans. on Signal Processing* [see also *IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing*], 2004, 52 (1): 202 – 213.
- [6] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, Vol.8: 1451 – 1458.
- 王永学: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为自适应调制技术、多载波 OFDM 系统、无线通信系统中的信号处理.
- 陈芳炯: 男, 1975 年生, 讲师, 研究方向为盲信道估计、多用户检测、下一代移动通信系统.
- 韦 岗: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究方向为语音信号处理、通信信号处理、下一代移动通信系统.