

自适应编码调制系统中影响估计性能的信道参数及其对系统性能的影响

孙 君¹, 袁东风^{1,2}

(1. 山东大学信息科学与工程学院, 山东济南 250100; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 在已有的误差函数的基础上, 结合信道的功率谱特性, 分析了自适应编码调制(ACM)系统的估计性能, 并推导出含有重要信道参数的误差函数的闭合表达式, 找到了能够对估计性能产生影响的信道参数, 例如, 莱斯因子, 到达角的角度扩展等等. 通过对与估计性能相关的系统性能的分析, 明确了这些信道参数对估计性能乃至整个系统的作用和影响. 由于估计误差的存在, 系统选择自适应编码调制方案的信道信噪比(CSNR)的门限也有相应的改变. 在此研究了不同的信道传输环境对这种改变的影响程度.

关键词: 自适应编码调制系统; 估计性能; 信道参数; 系统性能

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)01-0028-04

The Channel Parameters Affecting the Estimation and System Performance in ACM Systems

SUN Jun¹, YUAN Dong feng^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;

2. State Key Laboratory on Mobile Communication, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The relationship between the mean square error (MSE) of estimation and the general power spectral of channels is discussed here. Deduce the expression of MSE function including variant important channel parameters, among which some ones affect the estimate performance significantly, such as the Rice factor, the spread of the angle of arrival and so on. Then, the system performance criteria associated with the estimate error function is analyzed and the impacts of these channel parameters on the channel estimation and the system performances are explored. The thresholds of channel signal to noise ratio (CSNR) in ACM systems are also influenced by MSE. This affection is also investigated here under different propagation conditions.

Key words: adaptive coded modulation systems; estimate performance; channel parameters; system performances

1 引言

自适应编码调制(ACM)系统^[1~4]是一种对抗无线移动通信传播环境中时变多径衰落信道的有效通信技术. 为了使收、发端更有效地获得信道状态信息(CSI), 系统在发送端使用导频符号辅助的调制方式(PSAM)^[5,6]. 在接收端使用最优的估计和预测CSI技术. 在假设反馈信道理想的条件下, 发送端获得CSI的及时准确程度取决于接收端估计和预测性能的好坏. 由于预测与估计的原理相似, 其最优算法都采用线性最小均方差(LMMSE)算法, 并且衡量其性能的标准同样都是均方差函数(MSE), 因此以下统称为估计.

自2000年以来, 有关ACM的研究课题引起越来越多地关注, 其中包括ACM的实现^[7], ACM系统中的估计及其优化^[8~11], ACM应用于不同系统中的性能分析^[12,13]等等. 在这些文献中, 很少有具体地涉及到信道参数本身对系统性能的影响的, 或者说, 明确地指出系统性能直接的或间接的与哪些信道参数有关. 基于此, 本文试图从估计性能的分析入手解决这一问题, 以期得到一些有建设性的结论.

2 系统框架和信道模型

ACM系统的基本框架如图1.

其中, ACM模块包含 N 个调制和前项纠错编码组

收稿日期: 2006-09-25; 修回日期: 2007-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60372030); 国家留学回国基金(No. 教外司留[2003]406); 教育部移动通信国家重点实验室开放基金(No. A2005010); 教育部综合业务网理论与关键技术国家重点实验室开放基金(No. ISN705)

(CM), 正如 HIPERLAN/2, IEEE 802. 11a 和 3GPP 标准中用到的一样. ACM 模块根据反馈的 CSI 选择合适的 CM 传送信息. 信道是典型的多径衰落模型, 其冲击响应函数为:

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{K+1}} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M a_m e^{j(w_D \cos(\theta_m) t + \phi_m)} + \underbrace{\frac{\sqrt{K}}{\sqrt{K+1}} e^{j(w_D \cos(\theta_0) t + \phi_0)}}_{\text{LOS}} \quad (1)$$

式中, 第一项为多径衰落项, M 表示散射路径数, 第二项是直视分量项. K 是莱斯因子, $K=0$ 表示在发送端与接收端之间不存在直视路径. 参数 a_m 表示第 m 条路径的衰落幅度, 第一项是一个服从某一特定分布 (如, Rayleigh, Rice^[14], Nakagami^[15]) 的随机过程. 参数 θ_m 表示波到达接收天线的角度, 即到达角(AOA), w_D 是最大多普勒频率, ϕ_m 表示到达波的随机相位. AOA 服从 Von Mises 分布:

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} e^{\kappa \cos(\theta - \alpha)}, \quad \theta \in (-\pi, \pi] \quad (2)$$

可见, θ_n 由参数 κ 和 α 决定. 参数 κ 是衡量到达波的波束宽度的量, 参数 α 表示平均散射方向和接收端移动方向的夹角, 其变化引起波束方向的旋转.

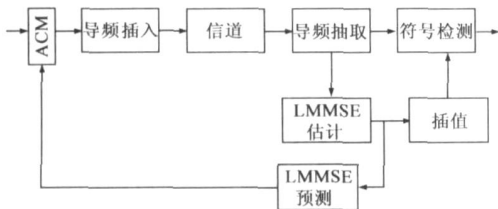


图 1 系统框图

3 估计误差函数

由[16, Appendix]可知, 评估 LMMSE 估计的性能函数 MSE 可以表示为:

$$\sigma_{\Delta h}^2 = \sigma_h^2 - \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{|b|^2 |S_h(\bar{w})|^2}{|b|^2 S_h(\bar{w}) + L\sigma_w^2} d\bar{w} \quad (3)$$

参数 σ_h^2 表示实际衰落信道的方差. 参数 b 表示导频符号的幅度, 满足 $|b|^2 = 1$. σ_w^2 是加性白高斯噪声(AWGN)的方差. $\bar{w} = w/w_D$ 是归一化的多普勒频率, 符号 L 表示两个连续的导频符号的间隔, L 也表示块衰落信道的信道相干时间为 L 个符号周期. $S_h(\bar{w})$ 表示信道的多谱勒功率谱密度(PS)函数, 根据文献[9]中的原始表达式, 通过变量替换, 我们可以推导出频率归一化后的表达式为:

$$S_h(\bar{w}) = \begin{cases} \frac{e^{\kappa \bar{w} \cos \alpha} \cosh(\kappa \sqrt{1-w^2} \sin \alpha)}{(K+1) \pi I_0(\kappa) \sqrt{1-w^2}}, & -1 < \bar{w} < 1 \\ \frac{w_D K}{K+1}, & \bar{w} = \pm 1 \end{cases} \quad (4)$$

为了进一步分析方便, 进行如下变量替换:

$$x = S_h(\bar{w}), \quad a = L\sigma_w^2, \quad b = \kappa \cos \alpha, \quad d = \kappa \sin \alpha$$

再将式(4)代入式(3), 可以得到表示式:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta h}^2 &= \sigma_h^2 - \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{|b|^2 |S_h(\bar{w})|^2}{|b|^2 S_h(\bar{w}) + L\sigma_w^2} d\bar{w} \\ &= \sigma_h^2 - \frac{w_D}{2\pi} \int_{-1}^1 \left[x - 2a + \frac{a^2}{x+a} \right] d\bar{w} \end{aligned} \quad (5)$$

因为 $\int_{-1}^1 x d\bar{w} = 0$, 应用 Simpson 数值分析方法, 得到 MSE 的数值表示式为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta h}^2 &= \sigma_h^2 - \left\{ \frac{w_D a}{\pi} - \frac{w_D a^2}{2\pi} \left[\frac{\Delta \bar{w}}{3} (f(w_0) + \Delta f(w_1) + 2f(w_2) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4f(w_3) + \dots + 2f(w_{n-1}) + f(w_n)) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $f(x) = \frac{1}{x+a}$, $\Delta \bar{w} = 2/n$, $w_i = -1 + i * \Delta \bar{w}$, $0 \leq i \leq n$, n 是偶数. 以 Jakes 型 PS 为例, 式(6)可简化为:

$$\sigma_{\Delta h}^2 \approx \frac{2}{A} \ln \left| \frac{2}{1+A} - 1 \right| \quad (7)$$

其中, $A = \sqrt{a+1/a-1}$, 由于 L 至少为 10, 可以保证 $a > 1$. 至此, 便得到了在一般和特定的多普勒 PS 的信道下, 估计的误差函数与信道的各种参数, 包括莱斯因子 K 、波束宽度 κ 、平均散射方向和接收端移动方向的夹角 α 、导频符号的间隔 L 、最大多普勒频率 w_D 、符号功率等在内的 MSE 的数值表达式.

4 信道参数对系统性能的影响

在 ACM 系统中, 有一个至关重要的参数就是信道信噪比(CSNR)的选择门限(switching thresholds). 该参数在 CSI 完全已知和存在估计误差的情况下是不同的. 在图 1 中, ACM 模块选择编码调制方案时的依据是: 当 CSNR 值 $\gamma \in [\gamma_i, \gamma_{i+1})$ 时, 所选的编码调制方案应该能够使得系统的比特错误概率(BER)不大于给定的目标值 BER_0 . 在 CSI 完全已知的情况下, 这种关系可以用表达式表示为^[7, (D. 22)]:

$$BER_n(\gamma_n) = \frac{a_n}{(1 + e^{c_n(\gamma_n - b_n)d_n})} \quad (8)$$

当考虑到估计的误差时, 即, $\gamma_n = \gamma_n + E[\Delta \gamma]$, 表达式(8)表示为

$$BER_n(\gamma_n - E[\Delta \gamma]) = \frac{a_n}{(1 + e^{c_n(\gamma_n - E[\Delta \gamma] - b_n)d_n})} \quad (9)$$

对式(9)求逆, 可得新的门限值为:

$$\gamma = \frac{\ln \left[\left(\frac{a_n}{BER_0} \right)^{1/d_n} - 1 \right] + (E[\Delta \gamma] + b_n) c_n}{c_n} \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} E[\Delta \gamma] &= E\{\gamma - \gamma\} = E\{|h|^2 - |\hat{h}|^2\} \frac{P}{N_0 B} \\ &= E\{|h|^2 - |\hat{h}|^2\} \bar{\gamma} \end{aligned}$$

$$= E\{|h- \hat{h}|^2 + 2|h\hat{h}|^2 + |\hat{h}|^2\} \bar{Y}$$

$$= (\sigma_{\Delta h}^2 + 2\sigma_h^2) \bar{Y}$$

5 结果分析

首先, 我们先来分析一下由公式(5)得到的结果.

图2中的信道(式(1))没有直视分量($K=0$), 左面的图是在 α 为零的情况下, 考查 κ 对MSE的影响. 参数 κ 越大, 说明波束越窄, 信号能量越集中于某一特定方向, 相对于全向天线($\kappa=0$)而言, 越有利于信号的接收, 因此MSE的性能也会变好. 可见, 由公式(5)得到的结论与实际系统中的情况相符合. 右面的图是在 κ 为零的情况下, 考查 α 对MSE的影响. 可见 α 变化, 并不能影响MSE的性能. 也就是说, 波束的旋转并不能影响系统估计的性能. 这与实际情况也是相符合的. 由此, 进一步验证了本文理论分析的正确性.

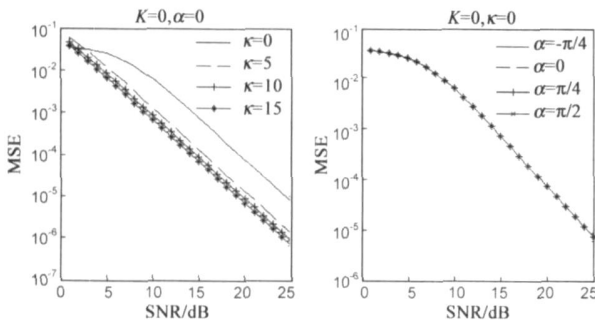


图2 信道参数 κ 和 α 与MSE的关系

图3说明了当信道中含有直视分量时会对系统的估计性能产生怎样的影响. 可以看出, 在信噪比较低的情况下, 直视分量的存在可以有效地改善系统的估计性能, K 值越大MSE性能越好, 但是随着信噪比的增加, 直视分量在估计性能上起的作用越来越弱, 甚至比不上 K 小的时候对估计性能的改善作用大. 说明,

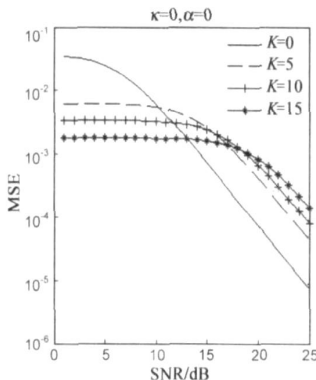


图3 直视分量对MSE的影响

当信道的其它参数不变, 信道中存在直视分量且其能量很强的时候, 系统的估计性能是比较稳定的.

接下来, 我们分析信道参数对CSNR选择门限的影响.

表1中第一行表示CSI完全已知时, 各编码调制方案的门限值. 在CSI完全已知的情况下, 信道状态与AWGN相似. 随着信道的各个参数去不同的值, 信道的功率谱也在发生变化, 根据式(5), 估计的性能也各不

相同, 从表中可以看出, 门限值也各不相同, 并且这种不同在低信噪比时表现得更明显, 随着信噪比的提高, 不同的差距缩小直至趋于零, 但是不完全的CSI, 即估计带来的误差还是很明显地影响了CSNR的选择门限值. 这可以从第2到5行与第1行的比较得到.

表1 带有估计CSI的系统在不同信道状况时CSNR选择门限的比较

信道功率谱	选择门限(dB)					
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
AWGN	2.7219	8.0256	11.2111	14.9086	17.8923	21.0884
理想低通功率谱信道	3.6712	8.9544	12.3751	15.9599	19.2980	22.2757
Jakes功率谱信道	4.7031	9.9669	13.3787	16.9607	20.2982	23.2758
$K=0, \kappa=15, \alpha=0$	4.6895	9.9561	13.3755	16.9600	20.2980	23.2758
$K=5, \kappa=\alpha=0$	4.6774	9.9604	13.3801	16.9626	20.2989	23.2760

6 结论

本文从对ACM系统估计性能的分析入手, 得到了含有对信道特性有重要影响的信道参数的误差函数表达式, 并分析了会对估计性能产生影响的信道参数. 结果发现, 传输波的波束宽度和收发端之间的直视分量不同程度地影响系统的估计性能并且它们在某一范围内的取值可以改善估计的性能, 也就是说, 当通信的传播环境因载波的波束宽度或收发端之间的直视分量不同而变化时, 系统的估计性能也会发生相应的变化. 信道条件好, 例如波束宽度窄, 或者信道直视分量的功率强, 则估计性能会有所提高. 而信道的另一个参数, 到达角的分布对估计性能和系统性能均没有影响. 此外, 我们还研究了在ACM系统中, 不完全的CSI对系统CSNR选择门限的影响. 发现由于估计误差的存在, 使得发送端在选择每种编码调制方案时, 各个方案间的门限值普遍提高了. 并且在同样考虑到估计误差的情况下, 对于不同功率谱的信道而言, 在低信噪比时估计性能对门限选择的影响比在高信噪比时明显.

参考文献:

- [1] A J Goldsmith, S G Chua. Variable rate variable power MQAM for fading channels [J]. IEEE Trans Commun, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [2] M S Alouini, A Goldsmith. Adaptive modulation over nakagami fading channels [J]. Wireless Personal Communications, 2000, 13(1): 119-143.
- [3] L Hanzo, W T Webb, T Keller. Single and Multi-Carrier Quadrature Amplitude Modulation [M]. Chichester, England: JohnWiley & Sons Press, 2000.
- [4] K J Hole, H Holm, G E Oien. Analysis techniques for adaptive coded modulation on flat fading channels [J]. IEEE J Select Areas Commun, 2000, 18: 1153-1158.

- [5] J K Cavers. An analysis of pilot symbol assisted modulation for rayleigh fading channels[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1991, 40(11): 686– 693.
- [6] X Tang, M S Alouini, A Goldsmith. Effect of channel estimation error on M-QAM BER performance in rayleigh fading[J]. IEEE Trans Commun, 1999, 47(12): 1856– 1864.
- [7] G E Øen, H Holm, K J Hole. Adaptive coded modulation with imperfect channel state information: system design and performance analysis aspects[A]. In Proceedings of IEEE International Symposium on Advances in Wireless Communications (ISWC-2002) [C]. Victoria, BC, Canada, September 2002.
- [8] G E Øen, H Holm, K J Hole. Impact of imperfect channel prediction on adaptive coded modulation performance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(3): 58– 769.
- [9] H Holm. Adaptive Coded Modulation Performance and Channel Estimation Tools for Flat Fading Channels[D]. Ph. D. dissertation, Norwegian Univ Sci Technol, Trondheim, Norway, Mar. 2002.
- [10] X Chai, G B Giannakis. Adaptive PSAM accounting for channel estimation and prediction errors[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1): 246– 256.
- [11] G E Øen, H Holm, K J Hole. Channel prediction for adaptive coded modulation in rayleigh fading[A]. In Proceedings of European Signal Processing Conference (EUSIPCO) [C]. Toulouse, France, September 2002.
- [12] J Hole, H Holm, G E øien. Performance analysis of adaptive coded modulation with antenna diversity and feedback delay [J]. Teletronikk-Information Theory and Its Applications, 2002, 98(1): 106– 113.
- [13] G E Øen, H Holm, K J Hole. Adaptive Coded Modulation Enhanced by Channel Prediction and Antenna Diversity[P]. Temporary Document TD(02) 054, Cooperation européenne dans ledomaine de la recherche Scientifique et Technique 273 (02), Espoo, Finland, May 2002.
- [14] G L Süber. Principles of Mobile Communication[M]. Kluwer Academic Publishers, 2nd edition, 2001.
- [15] M Nakagami. The nr distribution a general formula of intensity distribution of rapid fading[A]. In W. C. Hoffman, editor, Statistical Methods in Radio Wave Propagation, Pergamon Press (London, Oxford, New York, Paris) [C]. 1960. 3– 36.
- [16] Shuichi Ohno, Georgios B Giannakis. Average-rate optimal PSAM transmissions over time selective fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 4(1): 712– 720.

作者简介:



孙 君 女, 1980年8月生于山东烟台, 博士研究生, 山东大学信息科学与工程学院。主要研究方向为: 信道建模、信道估计、系统性能分析和优化、STBC MIMO 系统研究、跨层设计等。
E-mail: freyja@sdu.edu.cn



袁东风 男, 1958年4月生, 博士, 教授, 博士生导师, 山东大学信息科学与工程学院院长, “信息与通信工程”一级学科博士点学术带头人。主要研究领域为移动通信及其纠错抗干扰技术。近五年来在国内外著名期刊和重要国际会议上发表学术论文 200 余篇, 有 129 篇论文被 SCI(20 篇)、EI(109 篇) 收录。出版著作 3 部(含译著 1 部), 申报国家发明专利 9 项。科研成果先后获得奖励 10 余项。E-mail: dfyuan@sdu.edu.cn