

# 自适应 Turbo2QAM 编码调制及其在平坦 Nakagami 衰落信道的吞吐量性能

谢俊松, 范平志

(西南交通大学移动通信研究所, 四川成都 610031)

**摘要:** 本文提出了一种通用的自适应编码调制系统吞吐量性能分析方法. 基于各固定编码调制方式的误码率 (BER) 性能, 使每种编码调制方案对应于一个信道平均信噪比 (SNR) 范围, 再应用拉格朗日函数法得到使自适应编码调制系统吞吐量性能最大的信噪比转换门限, 可得到系统的平均吞吐量性能. 数值分析结果表明, 相对于自适应 M 进制正交幅度调制 (MQAM), 自适应 Turbo 编码 MQAM 系统吞吐量性能有显著提高, 并且该性能受瞬时误码率要求的影响较小. Nakagami 信道中, 在相同平均信道信噪比条件下, 随着 m 的增大, 系统吞吐量性能提高缓慢.

**关键词:** 编码调制; 自适应编码调制; 自适应调制; 衰落信道; 吞吐量

**中图分类号:** TN9291.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-0072-04

## Adaptive Turbo2QAM Coded Modulation and Its Throughput Performance in Flat Fading Nakagami Channels

XIE Jun2song, FAN Ping2zhi

(Institute of Mobile Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** In this paper, a general analytical framework for system throughput performance of adaptive coded modulation is proposed. Each coded modulation scheme is assigned with a certain range of average channel signal to noise ratio (SNR) based on bit error rate (BER) performance of each fixed coded modulation scheme. With the method of Lagrange, the SNR switching thresholds for throughput maximization of adaptive system are derived and the average throughput performance of the adaptive system is obtained. It is shown in our numerical results that significant improvements of system throughput performance of the adaptive Turbo2 coded MQAM modulation over adaptive MQAM modulation have been achieved and the throughput performance is insensitive to the instantaneous BER requirement. For the same average channel SNR in Nakagami channel, less improvement of the throughput performance is observed with the increase of m.

**Key words:** coded modulation; adaptive coded modulation; adaptive modulation; fading channel; throughput

### 1 引言

在移动无线传播环境下, 移动台接收信号质量取决于基站与移动台间的路径损失和信道衰落情况<sup>[1]</sup>. 自适应编码调制技术是在给定数据传输质量要求的前提下, 根据无线信道的实际情况来决定采用的编码和调制方式. 推动自适应编码调制技术研究发展的主要原因有两点: 一是因为非自适应系统链路预算须满足信道质量最差情况, 因而当信道质量较好时, 不能充分利用信道容量, 造成了频谱资源的浪费; 二是未来移动通信高速数据传输业务发展的需要. 自适应编码调制中编码码率和调制阶数的转换实质上是一种变速率传输控制方法, 以适应无线信道衰落的变化情况.

文献[2]是早期进行自适应编码技术研究的文献之一, 利

用编码码率和编码方案的改变实现链路自适应. 随着对高频谱效率自适应编码调制技术的深入研究, 目前调制和编码方式的焦点分别集中在 MQAM 调制和 Turbo 码的应用<sup>[3,4]</sup>. 研究衰落信道下信道容量对于自适应编码调制技术的研究具有指导意义, 文献[5]基于高斯信道 Shannon 容量定理, 研究了衰落信道容量与衰落信道平均 SNR 间相互关系, 证明了衰落信道中使信道容量最大的最优和次优功率自适应方案, 即基于注水原理 (Waterfilling) 的门限功率自适应方案和信道 SNR 反比 (Inversion) 方案. 在此基础上, Goldsmith 等还提出了可变功率可变速率的 MQAM 自适应调制系统<sup>[6]</sup>, 通过将调制阶数离散化并结合上述最优和次优方案, 研究了衰落信道中频谱效率, 结果表明, 相对于非自适应系统, 采用自适应调制方案可以获得 20dB 功率增益. 文献[7~9]也分别对固定和可发射功率

的变阶自适应MQAM系统的频谱效率,即对信道带宽的归一化吞吐量性能进行了研究.文献[10~13]通过综合考虑信号发射功率、调制阶数和编码速率等参数,对各种自适应技术的结合进行了更全面的分析,给出了系统误码率、误帧率和吞吐量等性能分析,目标是提高链路的平均频谱效率.实际应用方面,自适应编码调制已被列为实现WCDMA下行高速分组接入(HSDPA)的核心技术<sup>[14]</sup>.研究表明,在现有WCDMA协议规范下,利用下行链路3.84 Mcps的载波可以实现高达101.8 Mbps的数据传输速率<sup>[15]</sup>.文献[16]还针对3gpp HSDPA技术规范,选择QPSK、8PSK、16QAM和64QAM的调制方式和约束长度为9的卷积码编码方式,研究了多径干扰消除器在HSDPA中的应用并给出了大量仿真结果.理论研究和实际应用中,自适应编码调制技术都得到了高度重视.

本文将首先建立一种通用的自适应编码调制研究模型,这里所采用的编码和调制方案分别为Turbo编码和MQAM调制方式.通过计算机仿真得到变速率TurboMQAM的系统BER性能,将信道信噪比范围进行分段,使每种编码调制方案对应于某信噪比范围,由拉格朗日函数法得到使自适应系统吞吐量性能最优的信噪比转换门限,进而得到了自适应编码调制系统的平均吞吐量性能.

## 2 系统模型

采用自适应编码调制的无线传输系统模型如图1所示,该系统中采用了Turbo码编码方式和MQAM调制方式,但也可应用其它编码和调制方式,因而具有通用性.

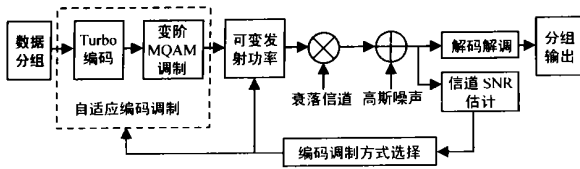


图1 自适应编码调制系统结构

设系统平均发射功率为  $S$ , 信道衰落包络为  $\sqrt{g(t)}$ , 则接收端平均信噪比为  $C(t) = Sg(t)/(N_0B)$ , 其中  $N_0$  为噪声单边功率谱密度,  $B$  为信道带宽. 设信道是静态且遍历的, 因而与时间  $t$  无关. 将信道瞬时发射功率  $S(C)$  与瞬时信噪比  $C$  的估计值  $\hat{C}$  变化相适应, 则接收端信噪比为  $CS(C)/S$ . 设信道估计是理想的且反馈延时为 0, 则接收端信噪比为  $CS(C)/S$ , 其中  $S(C)$  为与  $C$  相适应的发射功率大小.

自适应编码调制是以分组形式经编码调制后发送的, 每种编码调制方式对应的数据分组大小各不相同, 在平均发射功率和瞬时误比特率的条件下, 依据当前 SNR 大小选择合适的编码调制方式, 使系统实现尽可能高的吞吐量. 首先我们将信道信噪比范围划分为分别对应于  $N$  种编码调制方式的  $N$  个子集, 即:

$$R_1 = [0, C_1), R_2 = [C_1, C_2), \dots, R_j = [C_{j-1}, C_j), R_N = [C_{N-1}, \infty), j = 1, N \quad (1)$$

这里定义  $R_1$  范围内无分组传输. 系统的平均吞吐量定义为:

$$\sum_{i=1}^N b_i \int_{C_i}^{\infty} p(C) dC \quad (2)$$

其中  $b_i$  为第  $i$  种编码调制方式每码元比特数,  $p(C)$  为  $C$  的概率密度函数, 信道模型采用平坦 Nakagami 衰落信道模型, 该模型也称为广义信道模型, 由参数  $m$  控制. 当  $m$  为  $1/2$  时即为单边高斯信道模型, 当  $m$  为 1 时表示瑞利(Rayleigh)衰落信道模型, 当  $m$  趋于无穷大时可近似高斯(Gaussian)信道模型, 而其它如莱斯(Rician)信道模型也可由  $m > 1$  的 Nakagami 信道模型所表示. 平坦 Nakagami 信道中  $p(C)$  为:

$$p(C) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} C^{m-1} \exp\left[-\frac{mC}{C}\right] \quad (3)$$

其中  $C$  为  $C$  的均值. 而使系统平均吞吐量性能最大的限制条件包括平均发射功率限制和瞬时误比特率限制, 分别表示为:

$$\int_{C_i}^{\infty} S(C) p(C) dC = S \quad (4)$$

$$\text{BER}(C) \leq \text{ber} \quad (5)$$

其中  $\text{ber}$  为最大瞬时分组误比特率. 实际应用中, 由于自适应编码调制是以分组形式发送数据的, 这就需要考虑分组传输时间间隔的影响, 在一个分组的传输过程中, 应使随机时变信道信噪比不至变化到另一种编码调制方式对应的信噪比范围. 文献[6]利用有限状态马尔可夫模型, 给出了某些特定条件下的信道 SNR 平均持续时间和换算关系, 例如, 当最大多普勒频移为 100Hz、平均 SNR 为 10dB 或 20dB 时, 最小平均持续时间为 0.301ms, 因而当最大多普勒频移为 10Hz, 对应于移动台低速运动速率为 51.4Km/h 时, 其最小值也为 3.01ms, 本文设系统参数满足分组时间间隔要求.

## 3 性能分析

设  $S_i$  为系统中第  $i(i = 1, N)$  种编码调制方式在加性白高斯噪声(AWGN)信道中实现误比特率为  $\text{ber}$  所需发射功率, 为实现最大瞬时分组误比特率的要求,  $S_i(C)$  应满足:

$$C \frac{S_i(C)}{S} = E \frac{S_i}{N_0 B} \quad (6)$$

对于给定的  $\text{ber}$ , 可以由系统在 AWGN 信道中误比特率与信道信噪比的对应关系确定每种编码调制方式的  $S_i$ , 其中对应关系将通过计算机仿真获得. 这里取满足式(6)的  $S_i(C)$  最小值, 因而式(4)可以表示为:

$$\sum_{i=1}^N \int_{C_i}^{\infty} \frac{S_i(C)}{S} p(C) dC = \sum_{i=1}^N \int_{C_i}^{\infty} \frac{S_i}{N_0 B C} p(C) dC = 1 \quad (7)$$

在编码调制方式集合选定后, 我们寻找使系统吞吐量性能最大的对应于各编码调制方式的信道信噪比区域门限值  $C_i$ , 在采用  $N$  种编码调制方式的系统中, 可以得到  $N$  个门限值集合  $\{C_0, C_1, C_2, \dots, C_{N-1}\}$ , 其中  $C_0$  为 0. 结合式(2)和式(7), 利用等式约束下的最优极值求解拉格朗日(Lagrange)方法, 使系统吞吐量式(2)最大的  $G$  求解拉格朗日函数可以表示为:

$$\sum_{i=1}^N b_i \int_{C_i}^{\infty} p(C) dC + K \left\{ \sum_{i=1}^N \int_{C_i}^{\infty} \frac{S_i}{N_0 B C} p(C) dC - 1 \right\} \quad (8)$$

其中  $K$  为拉格朗日乘子, 将式(8)对  $C_i$  求导并令其为 0, 即:

$$(b_{i+1} - b_i) p(C_i) + \frac{K S_{i+1} - S_i}{N_0 B C_i} p(C_i) = 0 \quad (9)$$

则  $G$  可以表示为:

$$C_i = \frac{-K(S_{i+1} - S_i)}{N_0 B (b_{i+1} - b_i)} \quad (10)$$

通过仿真确定满足  $ber$  要求的各编码调制方式下信道信噪比大小, 该值对应于式(7)中  $S_i/N_0B$ , 由式(10)将  $G$  表示为  $K$  的函数并代入式(7), 得到由  $K$  表示的积分上下限的方程, 利用 MATHEMATICA 或 MATLAB 求解方程得到  $K$  和  $C_i$ , 最后由式(2)得到系统平均吞吐量性能. 可以看出, 当信道的平均信噪比  $C$  不同时, 各信噪比区域门限  $G$  也是不同的.

在上述分析过程中, 对应于给定误比特率  $ber$  大小要求, 通过仿真的方法确定所需的信道 SNR 大小, 再确定用于编码调制方案选择的信道 SNR 门限, 并得到系统平均吞吐量性能. 同时, 该分析方法与系统所采用的编码和调制方案是无关的, 因而可以应用于采用其它编码和调制方案的自适应编码调制系统.

### 4 数值与仿真结果

基于 COSSAP 仿真环境, 我们分别对 MQAM ( $M=16, 64$ ) 和不同码率(1/2, 1/3) Turbo 码组合编码调制系统在高斯信道下误比特率性能进行了仿真. 仿真条件为: 子译码器码率为 1/3, 译码输入为解调软映射, 算法采用 MAXLOG2MAP, 生成多项式为 11 和 13, 约束长度为 4, Turbo 码解码最大迭代次数为 8, 分组大小为 240 码元, 交织器大小为各调制方式下分组中比特数. 仿真结果如图 2 所示.

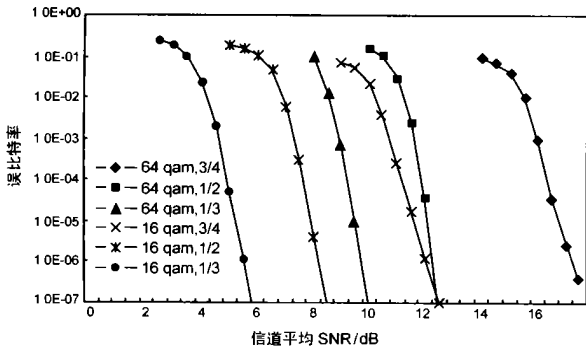


图 2 Turbo2QAM 编码调制在 AWGN 信道中误比特性能

与文献[3]、[4]相比, 仿真结果基本是一致的, 存在的差异主要是由于交织器大小差别和由于解调软映射应用带来的性能增益. 我们需要给定传输的 BER 要求, 对于数据传输, 一般要求 BER 为  $10^{-6}$ . 而在第三代移动通信系统中, 实时业务和非实时业务的 BER 要求分别为  $10^{-3}$  和  $10^{-5}$ . 给定 BER 下, 不同编码调制方式对应信道平均 SNR 大小如表 1 所示.

由于 64QAM, 1/3 码率 Turbo 码和 16QAM, 1/2 码率 Turbo 码这两种编码调制方式的(比特/码元)数相同, 而 64QAM, 1/3 码率 Turbo 码编码调制方式需要更高的 SNR, 因而自适应链路中将不被采用. 同样, 64QAM, 1/2 码率 Turbo 码编码调制方式也不被采用.

表 1 不同误比特率要求下, 各编码调制方式对应信道平均信噪比 SNR

编码调制方式	16QAM 1/3 码率	16QAM 1/2 码率	16QAM 3/4 码率	64QAM 1/3 码率	64QAM 1/2 码率	64QAM 3/4 码率
比特/码元	4/3	2	3	2	3	9/2
BER= $10^{-3}$ 对应 SNR	41.6dB	71.25dB	101.75dB	81.9dB	111.55dB	16dB
BER= $10^{-4}$ 对应 SNR	41.9dB	71.65dB	111.15dB	91.22dB	111.85dB	161.3dB
BER= $10^{-5}$ 对应 SNR	51.2dB	71.87dB	111.55dB	91.5dB	121.1dB	161.7dB
BER= $10^{-6}$ 对应 SNR	51.55dB	81.15dB	121.05dB	91.72dB	121.3dB	171.25dB

应用上节分析方法, 可以得到由式(2)表示的系统平均吞吐量性能, 如图 3 和 4 所示. 图 3 和图 4 中, 分别给出了由文[5]中式(7)得到的衰落信道 Shannon 容量(以对带宽  $B$  的归一化表示). 图 3 给出了 Nakagami 信道当  $m=1$  时, 即瑞利信道下不同信道瞬时 BER 要求时自适应 Turbo2QAM 编码调制(ATuCM)系统与文[6]中图 3 给出的自适应 MQAM 调制(AQAM)系统吞吐量(Throughput)性能比较. 文[6]的图 3 中给出的 AQAM 由于调制阶数是连续的, 因而可以看成是自适应 MQAM 调制吞吐量性能上界. 与文[6]中结果相比, 可以发现由于 Turbo 码在自适应编码调制中的应用带来的吞吐量性能, 也即系统频谱效率的显著提高. 同时, 与文[6]中采用 AQAM 时情况不同的是, 在不同信道瞬时 BER 要求下, 自适应 Turbo2QAM 系统吞吐量性能差异不大, 这是由于 Turbo 码的应用使自适应系统 BER 随信道 SNR 增加而快速下降的结果. 随着信道平均 SNR 的增加, ATuCM 系统吞吐量性能与信道容量相差越来越大并趋于恒定, 这是由于自适应 ATuCM 系统的 Turbo 码码率最大只有 3/4. 因而, 当达到该最大吞吐量时, 我们需要通过选择具有更高码率更高阶 MQAM 的编码调制方式才能实现更高吞吐量.

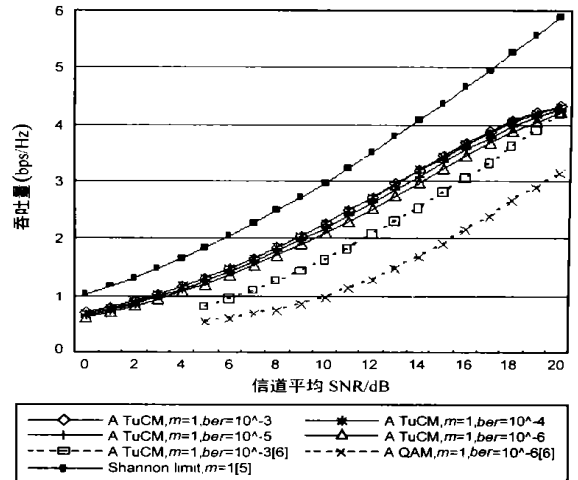


图 3 自适应 Turbo2QAM 编码调制(ATuCM)在平坦 Nakagami ( $m=1$ ) 衰落信道中吞吐量性能

图 4 给出了 Nakagami 信道中当  $m$  不为 1 时的系统吞吐量性能。当  $m=1/2$  时, 对应着信道质量较差的单边高斯信道模型, 此时, 系统吞吐量性能有明显下降。而在相同信道 SNR 情况下, 随着  $m$  的增大, 系统吞吐量性能提高不明显, 即吞吐量性能随信道衰落的改善变化不明显, 并且此时的归一化 Shannon 容量随  $m$  的增大也提高缓慢。同时, 随着  $m$  的增大, 系统实现最大吞吐量所需的平均信道 SNR 减小。

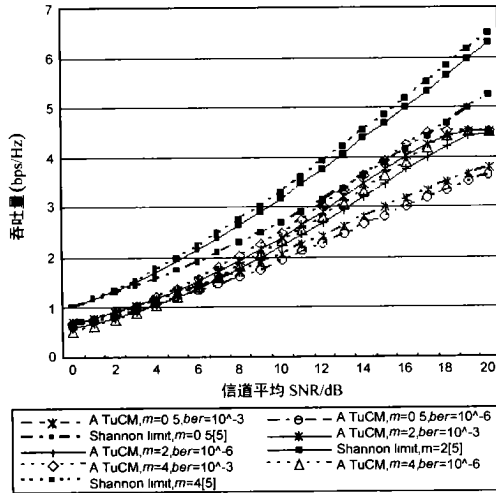


图 4 自适应 Turbo-QAM 编码调制 (ATuCM) 在平坦 Nakagami ( $m=0.5, 2, 4$ ) 衰落信道中吞吐量性能

## 5 结论

本文基于各固定编码调制方式的误码率性能, 研究了自适应编码调制系统吞吐量性能最大的最优信噪比转换门限集合, 进而得到了自适应编码调制系统的最大平均吞吐量性能。本文的分析方法与系统所采用的编码和调制方案无关, 是一种具有普遍应用意义的自适应编码调制系统吞吐量性能分析方法。本文的数值结果表明, Turbo 码在自适应编码调制系统中应用可使系统吞吐量性能有显著提高, 并且该性能受瞬时误码率要求的影响较小。在所分析的平坦衰落 Nakagami 信道中, 系统实现最大吞吐量所需的平均信道 SNR 随  $m$  的增大而减小, 而当信道平均 SNR 一定时, 系统吞吐量性能随着  $m$  的增加而增长缓慢。

## 参考文献:

- [1] Proakis J G. Digital communications (3rd. ed.) [M]. NY: McGraw-Hill, 1995: 758- 777.
- [2] Vucetic B. An adaptive coding scheme for time-varying channels [J]. IEEE Trans., 1991, COM29(5): 653- 663.
- [3] Goff S L, et al. Turbo codes and high spectral efficiency modulation [A]. Proc. Int. Conf. Commu. [C]. New Orleans, USA, 1994: 645- 649.
- [4] Benedetto S, et al. Parallel concatenated trellis coded modulation [A]. Proc. Int. Conf. Commu. [C]. Dallas, USA, 1996: 974- 978.

- [5] Goldsmith A, et al. Capacity of fading channels with channel side information [J]. IEEE Trans., 1997, IT43(4): 1986- 1992.
- [6] Goldsmith A, et al. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels [J]. IEEE Trans., 1997, COM245(10): 1218- 1230.
- [7] Webb W T, et al. Variable rate QAM for mobile radio [J]. IEEE Trans., 1995, COM243(7): 2223- 2230.
- [8] Alouini M S, et al. Adaptive modulation over Nakagami fading channels [J]. Wireless Personal Commu., 2000, 13(1): 119- 143.
- [9] Wang H, et al. Variable-rate modulation for wireless communications [A]. Future Telecommu. Conf. [C]. Peking, China, 2001: 27- 30.
- [10] Alamouti S M, et al. Adaptive trellis-coded multiple-phase-shift keying for Rayleigh fading channels [J]. IEEE Trans., 1994, COM242(6): 2305- 2314.
- [11] Matsuka H, et al. Adaptive modulation system with variable coding rate concatenated code for high quality multimedia communication systems [J]. IEICE Trans., 1996, COM279(3): 328- 334.
- [12] Goldsmith A, et al. Adaptive coded modulation for fading channels [J]. IEEE Trans., 1998, COM246(5): 595- 602.
- [13] Lau V, et al. Variable-rate adaptive trellis coded QAM for flat fading channels [J]. IEEE Trans., 2001, COM249(9): 1550- 1560.
- [14] Motorola. Details of high speed downlink packet access [R]. [http://www.3gpp.org/\[DB/OL\],TSG2RAN#7,2000,RP2000126](http://www.3gpp.org/[DB/OL],TSG2RAN#7,2000,RP2000126).
- [15] TSG2RAN WG1. Technical specification group radio access network: physical layer aspects of UTRA high speed downlink packet access (Release 2000) [S]. [http://www.3gpp.org/\[DB/OL\],2001,3GPP TR 25.848\(200005\)](http://www.3gpp.org/[DB/OL],2001,3GPP TR 25.848(200005)).
- [16] Higuchi K, et al. Multipath interference canceller for high-speed packet transmission with adaptive modulation and coding scheme in WCDMA forward link [J]. IEEE J., 2002, SAC220(2): 419- 432.

## 作者简介:



分多址理论与技术、第三代移动通信关键技术等。

谢俊松 男, 1975 年 10 月生于安徽省天长市, 西南交通大学通信与信息系统专业博士生, IEEE 学生会员, 参加了国家 863 计划项目、国家自然科学基金重点项目等多项科研项目, 曾获中国科技发展基金会詹天佑铁道科技发展基金研究生奖, 已在 IEEE Trans. VT 等学术期刊及会议中发表论文近 20 篇, 主要研究方向为码



趣为移动通信、信息论与编码、信息安全等。

范平志 男, 1955 年 12 月生于四川广汉, 工学博士(英国), IEEE 高级会员, 西南交通大学教授, 英国 Leeds 大学和上海交通大学客座教授, ITWSDA. 01 和 PDCAT. 03 等国际会议大会主席, IEEE2TnS/WCMC/JHPCN 等国际刊物客座编辑, 出版中英文著作 6 部, 在国内外学术刊物发表研究论文近 100 篇, 完成发明专利 10 项, 主要研究兴