

# 无线网络中自适应调制编码联合 ARQ 的性能分析<sup>\*</sup>

程 军 李 鸥 来卫国

(信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

**摘 要** 自适应调制编码(AMC)利用无线信道衰落的特点,灵活调整发射速率,能有效提高带宽资源的利用率。自动要求重传(ARQ)利用错误重传来提高传输的可靠性。对自适应调制编码联合自动要求重传这一典型跨层设计问题进行了性能分析,分析了队头分组的发送过程,数学推导了队头分组的传输时间及其概率分布和平均传输时间。最后,研究了平均信噪比和多普勒频率对传输时间的影响。

**关键词** 跨层设计,自适应调制编码,自动要求重传,性能分析

## Performance Evaluation of Adaptive Modulation Coding Combined with ARQ over Wireless Links

CHENG Jun LI Ou LAI Wei-guo

(Information and Engineering Institute, Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** Adaptive modulation and coding (AMC) makes full use of wireless channel fading, adjusts transmitting parameters flexibly, and improves spectral efficiency. Automatic repeat request (ARQ) enhances the reliability of transmission by the error-correcting capability of retransmission. The transmitting process of head of line (HoL) packet serviced by combing AMC and truncated ARQ was analyzed, and the analytical expressions for transmission time and corresponding probability distribution were derived. Finally, the impacts of SNR and Doppler frequency on transmission time were investigated.

**Keywords** Adaptive modulation and coding (AMC), Automatic repeat request (ARQ) protocol, Cross-layer design, Performance evaluation

### 1 引言

近几年,随着无线通信技术的迅速发展,自适应调制编码(AMC)得到广泛研究和实际应用<sup>[8-11]</sup>。与调制编码方式固定相比,AMC 充分利用无线信道衰落的特点,当信道质量好时,使用高级的调制编码方式;当信道质量差时,使用基本的调制编码方式,从而有效提高带宽资源的利用率和数据传输效率。

与 AMC 不同,自动要求重传(ARQ)是一种简单成熟的链路层数据传输控制算法,利用错误重传来提高传输的可靠性。灵活设置重传次数,能在传输效率与可靠性间取得较好折衷。

当前,跨层设计是一大研究热点。与传统的分层设计不同,充分利用层与层之间的信息,实现资源的优化利用和系统性能的提高<sup>[1-3,12,13]</sup>。文献[1]中提出一种联合 AMC 和 Truncated ARQ 的机制,从业务对时延和丢包率的要求出发,求出 ARQ 的最大重传次数和物理层的错包率,进而设计 AMC。该机制一方面满足业务对时延和丢包率等 QoS 要求,另一方面能提高系统的吞吐量,但对业务时延的分析并没有考虑分组的排队时延。文献[2]分析了一种联合物理层的 AMC 和数据链路层的队列的跨层队列模型,将队列服务过程看作多速率的动态服务过程,得出了队列性能指标和频谱效率等,但文中没有分析 ARQ 对排队性能的影响。文献[3]弥补了文献[1,2]的不足,综合分析了 QoS 业务在联合 AMC 和

Truncated ARQ 服务下的链路层排队问题,得出分组丢弃率、分组错误率、分组平均时延和系统吞吐量等性能指标,但对联合 AMC 和 Truncated ARQ 这一队列服务过程并没有进行分析。本文研究了联合 AMC 和 Truncated ARQ 这一队列服务过程,分析了队头分组的传输时间及其概率分布,得出了队头分组的平均服务时间等性能指标,最后研究了平均信噪比和多普勒频率对传输时间的影响。

本文组织如下:第 2 节介绍了系统模型、无线信道衰落和 AMC,给出了进行服务过程分析的假设前提;第 3 节分析了联合 AMC 和 Truncated ARQ 下的队头分组发送过程,推导了队头分组的传输时间及其概率分布,得出了平均服务时间;第 4 节进行了仿真分析,给出了数值结果,验证了分析的准确性。

### 2 系统模型

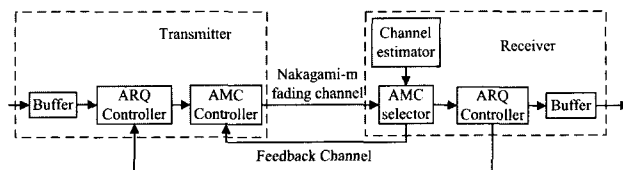


图 1 无线系统与信道衰落模型

与文献[1-3]相同,我们考虑点对点无线通信链路,如图 1 示。其中发送端与接收端的缓存器最多可容纳 B 个分组,并

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(60472064)。程 军 工程师,博士研究生,研究方向为无线资源调度;李 鸥 博士生导师,研究方向为宽带通信网;来卫国 工程师,博士研究生,研究方向为 QoS 路由、网络组播技术。

按 FIFO 模式进行操作。ARQ 控制器用于调整和控制 Truncated ARQ 协议的操作。AMC 选择器和控制器根据信道质量状况,分别用于发射模式的选择和更新。

我们用 Nakagami-m 模型<sup>[1-3,6,7]</sup>描述无线信道衰落,并用 FSMC 信道模型表示信道状况及其变化。采用 AMC 机制,信道状态不同,使用不同的调制编码方式。将接收端的 SNR 划分为互不重叠的间隔,其中边界点为  $\Gamma_n, n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$ ,且满足  $\Gamma_0 < \Gamma_1 < \Gamma_2 < \dots < \Gamma_N$ 。如果  $\Gamma_n < \Gamma < \Gamma_{n+1}$ ,称信道处于状态  $n$ 。根据 Nakagami-m 模型,信道处于状态  $n$ ,即选择第  $n$  种 MC 方式的概率为

$$Pr(n) = \frac{\Gamma(m, m\Gamma_n/\bar{r}) - \Gamma(m, m\Gamma_{n+1}/\bar{r})}{\Gamma(m)} \quad (1)$$

其中  $\bar{r}$  表示平均信噪比,  $m$  为 Nakagami 衰落参数。  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数。

假设信道变化为慢衰落,则不同信道状态(MC 方式)间的转移矩阵可描述为

$$P_C = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ P_{1,0} & P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & P_{N-1,N-2} & P_{N-1,N-1} & P_{N-1,N} & \\ 0 & \dots & \dots & 0 & P_{N,N-1} & P_{N,N} & \end{bmatrix} \quad (2)$$

且矩阵中的状态转移概率分别表示为

$$P_{n,l} = 0, |l-n| \geq 2 \quad (3)$$

$$P_{n,n+1} = \frac{N_{n+1}T_f}{Pr(n)}, P_{n,n-1} = \frac{N_nT_f}{Pr(n)} \quad (4)$$

$$P_{n,n} = \begin{cases} 1 - P_{n,n+1} - P_{n,n-1}, & 0 < n < N \\ 1 - P_{0,1}, & n = 0 \\ 1 - P_{N,N-1}, & n = N \end{cases} \quad (5)$$

式(3)–(5)中,  $T_f$  表示相干时间间隔(CTI)的长度,  $N_n$  表示发射模式  $n$  的跨级速率,并且  $N_n$  可利用下式进行估计,其中  $f_d$  表示最大多普勒频移。

$$N_n = \frac{\sqrt{2\pi}f_d}{\Gamma(m)} \left(\frac{m\Gamma_n}{r}\right)^{m-0.5} \exp\left(-\frac{m\Gamma_n}{r}\right) \quad (6)$$

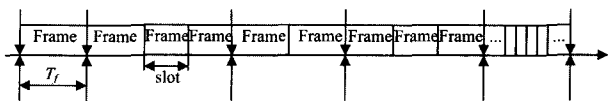


图2 相干时间间隔、帧和时隙分配示意图

在正式分析之前,给出文中所做的相关假设:

1) 时间轴以 CTI 为单位分为许多间隔,信道在相干时间间隔 CTI 内保持不变,使用相同的 MC,但在 CTI 间信道以 FSMC 发生状态转移。

2) 系统有  $N$  种调制编码(MC)方式,其中 1 为最基本的 MC,  $N$  为最高级的 MC。且对于第  $n$  种 MC,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,平均错包率  $\overline{PER}_n = P_0$ ,其中  $P_0$  表示系统所要求的错包率。

3) 发送的分组定长,一帧数据最多包含一个分组,不考虑重传,一帧数据的发送时间称为一个时隙(SLOT)。调制编码方式不同,时隙的长度不同。对于最基本的 MC,假设一帧数据的发送时间为一个 CTI,即  $L_{slot,1} = L_{CTI}$ ,对于  $MC_2, L_{slot,2} = L_{CTI}/2$ ,以此类推,  $L_{slot,n} = L_{CTI}/n, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

4) 队头分组的发送经历  $k$  次重传,  $k \in \{0, 1, 2, \dots, N_{max}\}$ ,其中  $k=0$  表示发射成功。显然  $Pr(N_r=k) = P_0^{k-1}(1-P_0)$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_{max}\}, Pr(N_r=0) = 1 - P_0$ 。

5) 信道反馈是瞬时和完美的,分组发送后,发送端立刻知道发送成功与否。发送不成功时,根据信道状况相应调整 MC 并进行重传。

### 3 发送过程分析

在联合 AMC 和 Truncated ARQ 的服务过程下,队头分组的发送会经历最多  $N_{max}$  次重传,而每次重传所经历的信道状态可能相同,也可能不同,因此重传时间和传输时间都是变化的。

我们采用与文献[3]类似的方法,以  $K_i$  表示信道状态  $c_i$  所包含的发射时隙数,  $K_i = \frac{L_{CTI}}{L_{slot,i}}, i \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$ 。  $N_i$  表示从进入信道状态  $c_i$  开始到当前发射时刻所使用的发射时隙数,满足  $N_i(t+1) = (N_i(t) + 1) \bmod (K_i)$ ,其中  $N_i(t+1)$ 、 $N_i(t)$  分别表示  $t+1$  时刻和  $t$  时刻  $N_i$  的取值。以  $(C_r, N_r)$  二元组表示队头分组发送所处信道状态和重传次数,  $C_r \in \{1, 2, \dots, N\}, N_r \in \{0, 1, 2, \dots, N_{max}\}$ ,显然,  $(C_r, N_r)$  的状态转移符合以下关系:

$$1) m = n = 0$$

$$P_{(i,m)(j,n)} = P_{(i,0)(j,0)} = \begin{cases} 1 - \overline{PER}_i, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

$$2) 0 \leq m < N_{max} - 1, 1 \leq i, j \leq N$$

$$P_{(i,m)(j,m+1)} = \begin{cases} \overline{PER}_i U(N_i, K_i), & i = j \\ \overline{PER}_i \delta(N_i, K_i) P_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中, } U(N_i, K_i) = \begin{cases} 1 & N_i \leq K_i \\ P_{ii} & N_i > K_i \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta(N_i, K_i) = \begin{cases} 0, & N_i \leq K_i \\ 1, & N_i > K_i \end{cases} \quad (10)$$

$$3) m = N_{max}; 1 \leq i, j \leq N$$

$$P_{(i,m)(j,0)} = \begin{cases} U(N_i, K_i) & i = j \\ \delta(N_i, K_i) P_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

$$4) 0 < m < N_{max} - 1, 1 \leq i, j \leq N$$

$$P_{(i,m)(j,0)} = \begin{cases} (1 - \overline{PER}_i) U(N_i, K_i), & i = j \\ (1 - \overline{PER}_i) \delta(N_i, K_i) P_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (12)$$

根据上述  $(C_r, N_r)$  的状态转移关系,以重传次数  $N_r$  为约束,可依次求解队头分组的相应传输时间和概率分布,进而求出队头分组的平均传输时间。设  $T_k, P(T_k)$  分别表示重传次数  $N_r = k$  时的队头分组传输时间和相应概率。容易看出,  $N_r = 0$  时

$$T_0 = \frac{T_f}{i}, i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$P(T_0 = \frac{T_f}{i}) = \pi_i \quad (14)$$

其中,  $\pi_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$  表示信道状态的稳态分布。

进一步,

$$T_1 = \frac{T_f}{i} + \frac{T_f}{j}, i, j = 1, 2, \dots, N, |i-j| \leq 1 \quad (15)$$

$$P(T_1 = \frac{T_f}{i} + \frac{T_f}{j}) = \frac{\pi_i P_{(i,0)(j,1)}}{\overline{PER}_i} \quad (16)$$

从而可得出

$$ET_1 = \sum T_1 \cdot P(T_1) = \sum_{i=2}^N \left(\frac{T_f}{i} + \frac{T_f}{i}\right) \pi_i \cdot 1 + \sum_{j=1}^2 \left(\frac{T_f}{1} + \frac{T_f}{j}\right) \pi_1 P_{1j} \quad (17)$$

下面我们使用递推的方法求解  $T_k, P(T_k)$ 。设  $C_k$  表示第  $k$  次重传所形成的传输时间的集合,  $C_k = C_k^1 \cup C_k^2 \cup \dots \cup C_k^N$ , 其中  $C_k^i$  表示初始发送时刻处于信道状态  $i$  条件下第  $k$  次重传所形成的传输时间的子集合。进一步, 以  $T_k^{(i,j)}$  表示  $C_k^i$  的第  $j$  个传输时间。对  $T_k^{(i,j)}$ , 用 {信道状态  $c_j$ , 相应传输时间  $T_k^{(i,j)}$ , 事件概率  $P(T_k = T_k^{(i,j)})$ , 关联计数器  $R_j$ } 四元组来表征。显然, 对于每一个信道状态  $c_i, c_i \in \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$

$$C_{k+1}^i = \bigcup_j \left\{ T_k^{(i,j)} + \frac{T_f}{f(R_j, K_j)} \right\} \quad (18)$$

$$\text{其中, } f(R_j, K_j) = \begin{cases} j+1, & R_j = K_j, c_j \in (c_1, \dots, c_{N-1}) \\ j-1, & R_j = K_j, c_j \in (c_2, \dots, c_N) \\ j, & R_j < K_j, R_j = K_j, c_j \in (c_1, \dots, c_N) \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{显然, } P(f(R_j, K_j)) = \begin{cases} P_{j,j+1}, & f(R_j, K_j) = j+1 \\ P_{j,j-1}, & f(R_j, K_j) = j-1 \\ U(R_j, K_j), & f(R_j, K_j) = j \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{并且 } R_j \text{ 满足 } R_j(t+1) = (R_j(t) + 1) \bmod (K_j) \quad (21)$$

所以,

$$P\left(T_{k+1} = T_k^{(i,j)} + \frac{T_f}{f(R_j, K_j)}\right) = P(T_k^{(i,j)})P(f(R_j, K_j)) \quad (22)$$

利用上面的递推关系, 我们可求出  $N_r = k+1$  时的传输时间和相应概率。  $C_{k+1}$  表示重传次数  $N_r = k+1$  下的传输时间的集合, 则

$$\begin{aligned} ET_{k+1} &= \sum_{T_{k+1} \in C_{k+1}} T_{k+1} P(T_{k+1}) \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} T_{k+1}^{(i,j)} P(T_{k+1} = T_{k+1}^{(i,j)}) \end{aligned} \quad (23)$$

最后, 我们可以求出分组发送所经历的整个传输时间  $T$  的均值和方差:

$$\begin{aligned} ET &= E(ET_k) = \sum_{k=0}^{N_{\max}} ET_k P(N_r = k) \\ &= \sum_{k=1}^{N_{\max}} ET_k P_0^k (1 - P_0) + ET_0 (1 - P_0) \\ DT &= \sum (T - ET)^2 P(T) \\ &= \sum_{k=0}^{N_{\max}} \sum_{T_k \in C_k} (T_k - E(ET_k))^2 P(T_k) \\ &= \sum_{k=0}^{N_{\max}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} T_k^{(i,j)} \in C_k^i (T_k^{(i,j)} - E(ET_k))^2 P(T_k = T_k^{(i,j)}) \end{aligned} \quad (24)$$

#### 4 数值结果

本节借助 MATLAB 进行仿真分析, 给出数值结果, 验证分析的准确性。相关参数设置如下: 符号速率  $R_s = 1.08\text{M}$ , 分组长度  $N_p = 1080\text{bits}$ , 相干时间间隔长度  $T_f = 1\text{ms}$ , 最大重传次数  $N_{\max} = 8$ , 错包率  $P_0 = 0.01$ , 平均信噪比  $\text{SNR} = 10, 15, 20, 25\text{dB}$ , 多普勒频率  $f_d = 5, 10, 15\text{Hz}$ , Nakagami 衰落参数  $m = 1$ 。与文献[4]相同, AMC 的选择参照 IEEE802.16 标准[5]。

我们首先研究了重传时间的概率分布情况。当  $\text{SNR} = 20\text{dB}$ ,  $f_d = 5\text{Hz}$ ,  $N_r = 2$  时, 队头分组的传输时间的累积概率分布如图 3 所示。显然, 重传时间以较大置信度位于平均传输时间附近, 但也以较小概率远离平均传输时间。

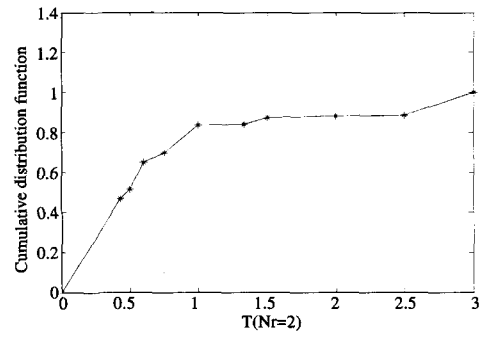


图 3  $T(N_r=2)$  的累积概率分布

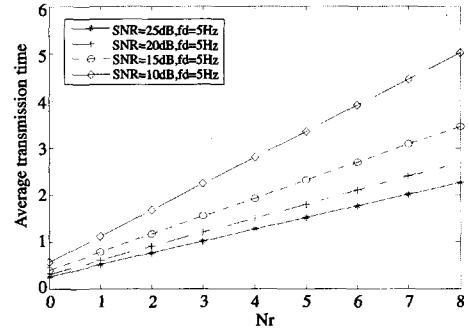


图 4 不同信噪比下的传输时间

其次, 我们分别研究了平均信噪比和多普勒频移对传输时间的影响, 分别如图 4 和图 5 所示。从中我们不难看出以下结论: (1) 较小的多普勒频率导致较长的衰落周期, 致使传输时间增加。 (2) 传输时间依赖于平均信噪比 SNR, 信噪比越高, 传输时间越短, 反之亦然。这与我们的直观感觉是一致的, 平均信噪比的提高意味着信道质量变好, 系统可使用较高级的发射模式, 同时系统传输的出错概率会相应降低, 从而分组的传输时间会相应减少。 (3) 与平均信噪比 SNR 相比, 多普勒频率对传输时间的影响甚微。从以上结果, 我们也可以看出, 队头分组的平均传输时间与不发生重传时的平均传输时间和重传次数紧密相关, 随着重传次数增加, 平均传输时间几乎呈线性增长。

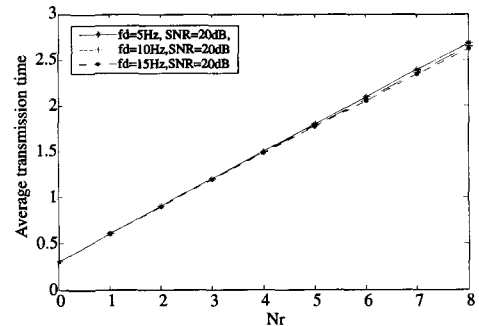


图 5 不同多普勒频率下的传输时间

**结束语** 本文研究了联合 AMC 和 Truncated ARQ 这一队列服务过程, 推导了队头分组的传输时间及其概率分布, 得出了队头分组的平均传输时间。本文的工作为相关跨层设计研究提供了一定基础。利用本文所得出的平均服务时间等指标, 可以很方便地进行队列容量、分组平均时延、分组丢弃率、

(下转第 54 页)

节各个检测参数。例如,在流量非常大的情况下可以将检测DDOS攻击的Agent的检测阈值适当降低,防止有误报发生,这样可以使用阈值来实现不同Agent的检测参数的调节。但在本实验中,为了和以前的工作比较,也使用了0.95的阈值。

表1 不同算法检测指标比较

检测方法	检测精度(%)	误报率(%)	漏报率(%)
非Agent算法	94.66	5.72	7.13
多Agent	94.01	6.87	12.11

由表1可知,单个主机对DARPA CUP99数据集中41维进行检测,检测的精度为94.66%,而多Agent进行检测准确率下降到94.01%。从各项指标可以看出,基于多Agent的检测方法检测效果要比使用高维数据进行检测的算法效果稍差。由此可知,使用MAS算法实现的多Agent协同入侵检测器大大地缩短了检测时间,缓解了网络流量对入侵检测带来的压力。

**结束语** 本文用MAS协同的方式同时对入侵的不同特征进行检测。协同入侵检测系统是一种全新的入侵检测系统,既可以有效地检测误用类型的入侵,又可以检测异常类型的检测。使用多Agent和并行机制,能够快速、较为准确地对不同类型的入侵特征进行检测。这种提高了入侵检测效率的方法对用于检测多传感器的系统也有参考价值。由于将高网络数据向量划分成多个低维数据分量的相关性很小,使用多Agent协同检测方法不会对检测的精度产生较大影响。

### 参考文献

[1] Denning D E. An Intrusion Detection Model [J]. IEEE Transaction on Software Engineering, 1987, 13 (2): 2222-2321  
 [2] 李仁发,李红,喻飞,等. 入侵检测系统中负载均衡研究与仿真.

计算机仿真学报 2004, 16(7): 1444-14449

[3] Chen S, Cheung, et al. GrIDS: A Graph based Intrusion Detection System for Large Networks [C] // Proceeding of 19th National Information System Security Conference, 1996 (1): 361-370  
 [4] Barrus J. A Distributed Autonomous-agent Network-Intrusion-Detection and Response System // Proceedings of the 1998  
 [5] Porras PA, Neumann PG. EMERALD: Event monitoring enabling responses to anomalous live disturbance [A] // Proceedings of the 20th National Information Systems Security Conference [C]. Baltimore Maryland USA, 1997: 353-365  
 [6] 朱永利, 宋少群. 基于广域网和多智能体的自适应协调保护系统的研究. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 15-20  
 [7] 孙知信, 唐益慰, 张伟, 等. 基于特征聚类的路由器异常流量过滤算法. 软件学报, 2006, 17(2): 295-304  
 [8] 肖云, 韩崇昭, 郑庆华, 等. 一种基于多分类支持向量机的网络入侵检测方法. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 562-565  
 [9] <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup.html>. School of information and computer science university of California. KDD cup 1999 data [EB/OL]  
 [10] Lee W, Stolfo SJ, Mok KW. A data-mining framework for building intrusion detection models [A] // The 1999 IEEE Symposium Security and Privacy. Berkeley, USA, 1999  
 [11] 刘向军, 刘世平, 张洁, 等. 多Agent系统通信与协作机制构造. 机械设计与制造工程, 2002, 31(2): 40-42  
 [12] 林杰, 薛华成. 多agent协同工作模型在基于Web的群决策支持系统中的应用. 计算机集成制造系统, 2001, 17(6): 25-28  
 [13] 李明欣, 余堃. 基于NDIS中间驱动的入侵检测. 计算机工程与设计, 2007, 28(1): 51-53  
 [14] 张波云, 殷建平, 蒿敬波, 等. 基于多重朴素贝叶斯算法的未知病毒检测. 计算机工程, 2006, 32(10): 11-13

(上接第50页)

系统吞吐量等相关跨层设计和性能分析。

### 参考文献

[1] Liu Q, Zhou S, Giannakis G B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links. IEEE Trans. Wireless Commun., 2004, 3(5): 1746-1755  
 [2] Liu Q, Zhou S, Giannakis G B. Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links; Cross-layer analysis and design. IEEE Trans. Wireless Commun., 2005, 4(3): 1142-1153  
 [3] Wang X, Liu Q, Giannakis G B. Analyzing and Optimizing Adaptive Modulation Coding Jointly With ARQ for QoS-Guaranteed Traffic. IEEE Trans. Vehicular Technology, 2007, 56(2): 710-720  
 [4] Niyato D, Hossain E. A Queuing - theoretic and Optimization - based Model for Radio Resource Management in IEEE 802. 16 Broadband Wireless Networks. IEEE Trans. On Computer, 2006, 55(1): 1478-1488  
 [5] IEEE Std 802. 16 a Local and Metropolitan Area Networks — Part 16. 2003  
 [6] Nakagami M. The m-distribution—A general formula of intensity distribution of rapid fading // Statistical Methods in Radio

Wave Propagation, Oxford, UK; Pergamon, 1960; 3-36

[7] Biglieri E, Caire G, Taricco G. Limiting performance of blockfading channels with multiple antennas. IEEE Trans. Inf. Theory, 2001, 47(4): 1273-1289  
 [8] 3G PPTR 25. 848 V4. 0. 0 Physical layer aspects of UTRA high speed downlink packet access (release 4). 2001  
 [9] Alouini M-S, Goldsmith A J. Adaptive modulation over Nakagami fading channels. Kluwer J. Wireless Commun., 2000, 13(1/2): 119-143  
 [10] Goeckel D L. Adaptive coding for time-varying channels using outdated fading estimates. IEEE Trans. Commun., 1999, 47: 844-855  
 [11] Goldsmith A J, Chua S-G. Adaptive coded modulation for fading channels. IEEE Trans. Commun., 1998, 46: 595-602  
 [12] Assaad M, Zeghlache D. Cross-layer design in HSDPA system to reduce the TCP effect. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2006, 24(3): 614-625  
 [13] Maharshi A, Tong L, Swami A. Cross-layer designs of multi-channel reservation MAC under Rayleigh fading. IEEE Trans. Signal Process., 2003, 51(8): 2054-2067  
 [14] Kleinrock L. Queuing Systems vol. I. New York: Wiley, 1975