

## 多速率调制无线信道服务过程及信道建模

房曙光<sup>①②</sup> 董育宁<sup>\*①</sup> 张晖<sup>①</sup> 王再见<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

<sup>②</sup>(无锡商业职业技术学院电子工程系 无锡 214153)

**摘要:** 现代无线网络中,为克服复杂无线信道对系统服务质量影响,自适应调制编码是应用于物理层的有效技术手段之一。该文采用队列技术分析无线信道服务过程与业务流过程和物理层自适应调制编码技术关系,对自适应调制编码无线信道服务过程建模;并提出一种基于服务过程突发特性等效的自适应调制编码无线信道建模方法。该文采用数值方法分析自适应调制编码无线信道服务过程所表现的突发性,验证了所提出无线信道建模方法的可行性和有效性。

**关键词:** 无线通信; 自适应调制编码; 队列分析; 突发特性; 信道建模

**中图分类号:** TN915

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2013)03-0696-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2012.00901

## The Service Process and Modeling of Radio Channel in Multi-rate Wireless Networks

Fang Shu-guang<sup>①②</sup> Dong Yu-ning<sup>①</sup> Zhang Hui<sup>①</sup> Wang Zai-jian<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(College of Telecommunication & Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>②</sup>(Electronic Engineering Department, Wuxi Institute of Commerce, Wuxi 214153, China)

**Abstract:** In modern wireless networks, Adaptive Modulation and Coding (AMC) is one of effective technologies adopted in physical layer to overcome complex wireless channel and improve quality of service of system. In this paper, the relation between wireless channel service process and traffic flow and AMC adopted in physical layer are analyzed, the wireless channel service process is modeled; and an equivalent burstiness characteristic AMC wireless channel modeling method is proposed. The burstiness character of AMC wireless channel and the feasibility and effectiveness of the proposed modeling method are proved with numerical analyses.

**Key words:** Wireless communications; Adaptive Modulation and Coding (AMC); Queuing analysis; Burstiness; Channel modeling

### 1 引言

服务质量(Quality of Service, QoS)是现代无线网络重要技术指标之一,第3代和第4代无线网络均支持多种QoS需求业务流<sup>[1]</sup>。物理层自适应调制编码技术(Adaptive Modulate and Coding, AMC)具有提高无线频谱资源利用率和系统QoS作用<sup>[2-6]</sup>,被3GPP, 3GPP2, HIPERLAN, IEEE802.11a, IEEE802.15.3以及IEEE802.16等现代无线通信标准广泛采用<sup>[7]</sup>。马尔科夫信道模型能够有效地表征

AMC无线信道动态特性,在无线信道建模中被广泛采用,从而使得队列技术成为分析无线网络QoS性能的一种重要技术手段,该技术基于测量或假设业务流模型和无线信道模型,因此无线信道模型准确性对QoS性能指标分析具有重要影响。而现代复杂无线通信系统中无线信道呈现随机变化<sup>[8]</sup>,使得无线信道建模具有很大挑战性。

马尔科夫模型是无线信道建模常用方法<sup>[9-12]</sup>。一阶马尔科夫信道模型具有结构简单易于计算的特点,但其自相关函数与实际无线信道自相关性不匹配,在很多情况下,采用一阶模型分析系统QoS性能无法获得正确结论<sup>[4,5]</sup>。文献[5]采用多维离散嵌入马尔科夫链构建AMC无线信道模型,文献[6]针对非饱和业务流、链路层有限长度队列以及AMC物理层技术的解码转发中继无线网络,将无线信道建

2012-07-12收到,2012-10-26改回

国家自然科学基金(60972038, 61271233, 61101105, 61001077),教育部博士点基金(20103223110001),江苏省2011年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ11\_0392),江苏省高等教育自然科学基金(10KJB510013)和南京邮电大学科研基金(NY208052)资助课题

\*通信作者:董育宁 Dongyn@njupt.edu.cn

模为有限状态马尔科夫链, 这些建模方法能够克服一阶马尔科夫信道模型自相关函数与信道自相关函数不匹配问题, 但其具有较高计算复杂度, 算法复杂度随信道状态数增加而呈现指数增加, 同时模型构建中存在大量复杂积分运算, 且该积分运算随无线信道模型复杂性增加而增加。高阶隐马尔科夫链模型能够精确体现无线信道特征<sup>[13]</sup>, 基于此, 借助队列分析技术能够对网络性能准确分析<sup>[14]</sup>, 然而, 在现代复杂无线通信系统中, 该方法同样具有很高的计算复杂度。

无线信道的衰减特性以及物理层调制编码技术使得无线信道服务过程呈现突发性特点, 该特性对无线网络通信链路 QoS 性能具有重要影响<sup>[15,16]</sup>。过程突发特性是衡量业务流特性的一个重要指标, 常用度量方法分别为过程一阶矩和过程二阶矩, 在结构上, 过程二阶矩的度量指标相对于一阶矩度量指标复杂得多<sup>[17]</sup>。在这些度量指标中, 二阶矩度量指标中的尖度因子函数综合考虑了业务流过程特点和服务系统对业务流过程所产生的影响, 相对于其他度量方法, 是一种更为有效的过程突发特性描述。尖度因子函数最初是由电传工程师开发, 用以近似中继点阻塞概率<sup>[18,19]</sup>, 其无限服务器组服务时间分布  $B(x)$  一般设定为指数分布。Eckberg 将尖度因子函数应用范围扩展到任意服务时间分布, 给出了通用尖度因子函数定义。对于任意给定的互补虚拟服务器组服务时间分布  $B^C(x) = 1 - B(x)$ , 通用尖度因子函数  $z\{B^C(x)\}$  定义为虚拟服务器组忙态服务器数量  $S(t)$  的方差-均值比<sup>[20]</sup>。在通用尖度因子函数基础上, 文献[17,18]分别给出了离散时域和流体业务流尖度因子函数表达形式, 并对其有效性予以验证, 使得尖度因子函数成为一种广泛应用的、有效表征过程突发特性参数。

基于以上分析, 本文综合考虑数据业务流、无线链路队列以及调制编码技术对 AMC 无线信道服务过程影响, 构建 AMC 无线信道服务过程模型, 并提出一种基于信道服务过程突发特性等效的无线信道模型构建方法。

## 2 AMC 信道服务过程突发特性

无线信道服务过程  $s_t$  受无线信道信噪比、物理层调制编码技术以及数据链路层业务流影响。该部分在瑞利衰减信道假设下, 物理层采用 AMC 技术, 建模无线信道服务过程, 并给出其突发特性表示。

将系统时间分割为时隙为  $\Delta t$  的离散时间间隔, 第  $n$  个时隙定义为时间间隔  $[n\Delta t, (n+1)\Delta t]$ 。定义 AMC 无线信道服务过程  $s_t$  为第  $t$  个时隙 AMC 无线

信道服务数据包数, 即物理层传输数据量。将数据链路层和物理层层间接口定义为先进先出缓存  $B$ , 其最大数据容量为  $b_N$  个数据包(图 1)。

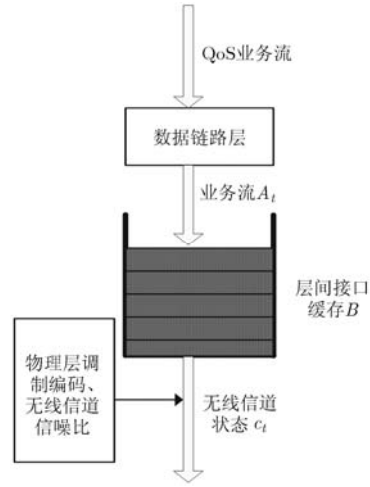


图1 无线信道服务过程

QoS 业务流经数据链路层形成业务流  $A_t$ , 进入层间接口缓存。无线信道状态  $c_t$  定义为在时隙  $t$  无线信道所能传输数据包数, 其受物理层调制编码技术、无线信道信噪比以及期望包差错率制约, 层间接口缓存  $B$  表现为一先进先出队列, 其状态  $b_t$  表示时隙  $t$  队列中数据量,  $b_t \in B$ ,  $B = \{b_0, \dots, b_N\}$ , 即在时间单位  $t$  结束时刻或时间单位  $t+1$  的开始时刻队列中所存在数据包量。

首先采用文献[5]或文献[7]算法获得 AMC 瑞利衰减信道状态转移矩阵为

$$P_c = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,N-1} & p_{0,N} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdots & p_{1,N-1} & p_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p_{N-1,0} & p_{N-1,1} & \cdots & p_{N-1,N-1} & p_{N-1,N} \\ p_{N,0} & p_{N,1} & \cdots & p_{N,N-1} & p_{N,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $p_{i,j}$ ,  $i, j \in \{0, \dots, N-1\}$  表示 AMC 无线信道状态  $c_t$  自  $i$  到  $j$  转移概率。

当  $A_t$  总能保证 AMC 无线信道有充足数据发送时(定义为状态 1, 记为  $S_1$ ), AMC 无线信道服务过程  $s_t$  等价于信道状态过程  $c_t$ , 此时信道服务过程状态转移矩阵与信道状态转移矩阵  $P_c$  等价; 而在实际中,  $A_t$  并不能总是保证 AMC 无线信道有充足数据发送, 可能存在缓存内数据量小于相应时隙无线信道所能发送数据量(定义为状态 2, 记为  $S_2$ ), 此时, AMC 无线信道服务过程  $s_t$  与  $c_t$  不等价。下面就系统处于状态  $S_2$  时, 构建无线信道服务过程  $s_t$  模型。

假定在  $t$  时隙开始时刻队列处于状态  $b_t$ , 并在该

时隙内无线信道处于状态  $c_t$ ，同时假设队列内数据先接受信道服务后，再接收来自数据链路层业务流，则在  $t$  时隙内队列状态为  $b_t = \max\{0, b_{t-1} - c_t\}$ ，从而在  $t$  时隙内队列中可容纳数据量空间为  $F_t = b_N - \max\{0, b_{t-1} - c_t\}$ 。如果在  $t$  时隙内到业务流  $A_t \leq F_t$ ，业务流均可进入队列，队列状态变为  $b_t = F_t + A_t$ ；如果  $A_t > F_t$ ，只有  $F_t$  个数据包允许进入队列，剩余  $(A_t - F_t)$  个数据包将会被丢弃，同时队列状态变为  $b_t = b_N$ ，则队列状态可表达为

$$\mathbf{P}_{\text{pair}} = \begin{bmatrix} P_{(b_0, c_0)(b_0, c_0)} & \cdots & P_{(b_0, c_0)(b_0, c_M)} & P_{(b_0, c_0)(b_1, c_0)} & \cdots & P_{(b_0, c_0)(b_N, c_M)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{(b_0, c_M)(b_0, c_0)} & \cdots & P_{(b_0, c_M)(b_0, c_M)} & P_{(b_0, c_M)(b_1, c_0)} & \cdots & P_{(b_0, c_M)(b_N, c_M)} \\ P_{(b_1, c_0)(b_0, c_0)} & \cdots & P_{(b_1, c_0)(b_0, c_M)} & P_{(b_1, c_0)(b_1, c_0)} & \cdots & P_{(b_1, c_0)(b_N, c_M)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{(b_N, c_M)(b_0, c_0)} & \cdots & P_{(b_N, c_M)(b_0, c_M)} & P_{(b_N, c_M)(b_1, c_0)} & \cdots & P_{(b_N, c_M)(b_N, c_M)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

时间单位  $t$  内 AMC 无线信道服务数据包量  $s_t$  受 AMC 无线信道状态  $c_t$  和无线链路队列状态  $b_{t-1}$  影响，显而易见取两者较小值，即

$$s_t = \lfloor \min\{b_{t-1}, c_t\} \rfloor \quad (4)$$

其中  $\lfloor x \rfloor$  表示对于  $x$  下取整。则 AMC 无线信道服务过程  $s_t$  状态集合为  $S = \{0, 1, \dots, s_t\}$ ，根据状态对  $(b_{t-1}, c_t)$  状态转移矩阵  $\mathbf{P}_{\text{pair}}$  可获得 AMC 无线信道服务过程状态转移矩阵  $\mathbf{P}_s$ 。

$$\mathbf{P}_s = \begin{bmatrix} p_{0,0} & \cdots & p_{0, \min\{b_N, c_M\}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{\min\{b_N, c_M\}, 0} & \cdots & p_{\min\{b_N, c_M\}, \min\{b_N, c_M\}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中元素  $p_{i,j}$  表示 AMC 无线信道服务过程由状态  $i \in \{0, 1, \dots, \min\{s_N, c_M\}\}$  到状态  $j \in \{0, 1, \dots, \min\{s_N, c_M\}\}$  转移概率。根据条件概率公式可由式(3)首先求得

$$p'_{i,j} = \sum_{\substack{\min(u,c)=i, \\ \min(v,d)=j}} P_{(u,c)(v,d)}, \quad i, j \in \{0, 1, \dots, s_t\} \quad (6)$$

然后将矩阵中每一行归一化，便可获得状态转移概率为  $p_{i,j}$  的 AMC 无线信道服务过程状态转移矩阵，从而完成无线信道服务过程建模。

根据以上所述，无线信道服务过程可建模为马尔可夫调制伯努利过程，其状态转移概率为  $p_{i,j}$ ，其每一状态伯努利相关参数可根据相应状态无线信道服务过程数据量均值获得。以  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{D} = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-1}, \pi_n]$  表示无线信道服务过程状态转移矩阵和状态转移稳态分布向量， $\mathbf{M}_1$  和  $\mathbf{M}_2$  分别对应于无线信道服务数据量一阶矩和二阶矩的对角阵， $\mathbf{e}$  和  $\mathbf{I}$  分别是单位矩阵和全 1 向量，无线信道服务数据包数量一阶矩和二阶矩可分别表示为  $m_1 = \mathbf{D}\mathbf{M}_1\mathbf{e}$  和  $m_2 = \mathbf{D}\mathbf{M}_2\mathbf{e}$ ， $\mu$  表示无线信道接收端服务速率(单

$$b_t = \min\{b_N, \max\{0, b_{t-1} - c_t\} + A_t\} \quad (2)$$

自式(2)可知队列状态  $b_t$  依赖于  $\{b_{t-1}, c_t, A_t\}$ 。业务流  $A_t$  独立于状态对  $(b_{t-1}, c_t)$ ，而  $b_{t-1}$  和  $c_t$  密切相关。为分析 AMC 无线信道服务过程，我们构建状态对  $(b_{t-1}, c_t)$  的有限状态马尔科夫链。采用文献[7]方法结合式(1)信道状态转移矩阵  $\mathbf{P}_c$  和  $A_t$  可获得状态对  $(b_{t-1}, c_t)$  状态转移矩阵  $\mathbf{P}_{\text{pair}}$ ，其中元素  $p_{(u,c)(v,d)}$  表示状态对  $(b_{t-1}, c_t)$  由  $(b_{t-1} = u, c_t = c)$  转换到  $(b_t = v, c_{t+1} = d)$  概率。

$$\begin{aligned} & \text{位时间服务数据量的倒数)，则无线信道服务过程突发特性可以离散时域尖度因子函数 } \tilde{z}_{\text{geo}}[\mu] \text{ 表示}^{[17]} \text{ 为} \\ & \tilde{z}_{\text{geo}}[\mu] \\ & = 1 + \frac{1}{2 - \mu} \\ & \cdot \left[ \frac{2(1 - \mu) \mathbf{D}\mathbf{M}_1\mathbf{P}(\mathbf{I} - (1 - \mu)\mathbf{P})^{-1} \mathbf{M}_1\mathbf{e} + m_2}{m_1} - 1 \right] \\ & - m_1/\mu \end{aligned} \quad (7)$$

### 3 AMC 无线信道服务过程突发特性等效建模

假定无线信道服务过程每一状态一阶矩和二阶矩可通过计算或测量获得。无线信道服务过程均值  $Em_1$  及尖度因子函数  $MZ(\mu)$  可类似文献[15]中方法测量获得，并假定每一状态无线信道服务过程服从伯努利分布。则根据式(7)，本部分给出一种突发性等效的无线信道建模方法。该方法中首先根据所测得无线信道服务过程尖度因子函数计算服务过程二阶矩；接下来定义可由尖度因子函数值计算获得的中间变量  $EY_i$ ；最后通过计算获得无线信道突发特性等效马尔科夫模型。

#### 3.1 信道服务过程二阶矩

根据式(7)，当  $\mu = 1$  时，过程的离散时域尖度因子函数  $\tilde{z}_{\text{geo}}[\mu]$  与过程一阶矩  $m_1$  和二阶矩  $m_2$  有以下关系成立，

$$\tilde{z}_{\text{geo}}(1) = m_2/m_1 - m_1 \quad (8)$$

则根据式(8)，可得出过程二阶矩  $m_2$  表示式(9)，

$$m_2 = (\tilde{z}_{\text{geo}}(1) + m_1)m_1 \quad (9)$$

由式(9)可知，根据实际测量所得信道服务过程尖度因子函数  $MZ(1)$  及其一阶矩  $Em_1$ ，可计算获得无线

信道服务过程二阶矩  $Em_2$ ,

$$Em_2 = (MZ(1) + Em_1)Em_1 \quad (10)$$

### 3.2 定义中间变量 $EY_i$

离散时域尖度因子函数标准定义为  $\tilde{z}_{\text{geo}}[\mu] = 1 + (K^*[1-\mu] - 1)/(2-\mu)$ ,  $K^*[1-\mu]$  为到达业务流协方差密度的  $Z$  变换,  $\mu$  为服务器服务速率, 详见参考文献[17], 为了表达方便, 定义变量  $\omega_i = 1 - \mu_i$ , 则可得  $K^*[\omega_i]$  与业务流过程尖度因子函数  $\tilde{z}_{\text{geo}}[\mu_i]$  关系式(11)。

$$K^*(\omega_i) = (\tilde{z}_{\text{geo}}(\mu_i) - 1)(\omega_i + 1) + 1 \quad (11)$$

将  $\tilde{z}_{\text{geo}}(\mu_i)$  表达式式(7)代入式(11), 则式(11)等效变换为

$$K^*(\omega_i) = \frac{2\omega_i DM_1 P (I - \omega_i P) M_1 e}{m_1} + \tilde{z}_{\text{geo}}(1) - \frac{2\omega_i}{1 - \omega_i} m_1 \quad (12)$$

为计算方便, 定义中间变量  $Y_i$ , 其表达式为式(13)。

$$Y_i = Y(\omega_i) = \frac{m_1}{2\omega_i} \left[ K^*(\omega_i) + \frac{2\omega_i}{1 - \omega_i} m_1 - \tilde{z}_{\text{geo}}(1) \right] \quad (13)$$

将式(12)代入式(13), 则式(13)等效变换为

$$Y_i = Y(\omega_i) = DM_1 P (I - \omega_i P) M_1 e \quad (14)$$

根据以上关系, 类似式(13)可获得无线信道服务数据流协方差密度的  $Z$  变化  $EK^*(\omega_i)$  和所测得信道服务过程离散时域尖度因子函数  $MZ(\mu_i)$  的关系为

$$EK^*(\omega_i) = (MZ(\mu_i) - 1)(\omega_i + 1) + 1 \quad (15)$$

并类似式(14), 获得中间变量  $EY_i$ ,

$$EY_i = EY(\omega_i) = \frac{Em_1}{2\omega_i} \left[ EK^*(\omega_i) + \frac{2\omega_i}{1 - \omega_i} Em_1 - EZ(1) \right] \quad (16)$$

### 3.3 求无线信道服务过程状态转移概率矩阵

定义向量

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_1 \mathbf{e} = [m_{1,1}, m_{2,1}, \dots, m_{n-1,1}, m_{n,1}]^T \quad (17)$$

其中  $m_{n,1}$  表示信道服务过程处于状态  $n$  时的一阶矩。

定义行矩阵

$$\mathbf{X}(\omega_i) = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n-1}, x_{i,n}] = DM_1 P (I - \omega_i P)^{-1} \quad (18)$$

$x_{i,n}$  为由式(18)所获得的中间变量。

将式(17)和式(18)代入式(14)可得以下关系式:

$$\mathbf{X}(\omega_i) \mathbf{M}_0 = Y(\omega_i) \quad (19)$$

结合式(18)并对式(19)作等效变换, 可获得

$$\mathbf{X}(\omega_i) (I - \omega_i P) = DM_1 P \quad (20)$$

将式(20)展开, 则可得到方程组

$$\left. \begin{aligned} x_{i,1}(1 - \omega_i p_{1,1}) - x_{i,2} \omega_i p_{2,1} - \dots - x_{i,n} \omega_i p_{n,1} \\ &= \pi_1 m_{1,1} p_{1,1} + \pi_2 m_{2,1} p_{2,1} + \dots + \pi_n m_{n,1} p_{n,1} \\ -x_{i,1} \omega_i p_{1,2} + x_{i,2}(1 - \omega_i p_{2,2}) - \dots - x_{i,n} \omega_i p_{n,2} \\ &= \pi_1 m_{1,1} p_{1,2} + \pi_2 m_{2,1} p_{2,2} + \dots + \pi_n m_{n,1} p_{n,2} \\ &\vdots \\ -x_{i,1} \omega_i p_{1,n} - x_{i,2} \omega_i p_{2,n} - \dots + x_{i,n}(1 - \omega_i p_{n,n}) \\ &= \pi_1 m_{1,1} p_{1,n} + \pi_2 m_{2,1} p_{2,n} + \dots + \pi_n m_{n,1} p_{n,n} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

方程组(21)等式左边和右边分别相加并结合  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{D}$  性质, 有

$$x_{i,1} + x_{i,2} + \dots + x_{i,n} = m_1 / (1 - \omega_i) \quad (22)$$

则由式(21), 式(22)可获得由状态转移概率  $p_{i,j}$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$  和常量所表示的变量  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}$ , 将  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}$  表达式代入式(20), 并结合  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{D}$  性质, 可得式(23)。

$$f_{Y(\omega_i)}(p_{1,n}, \dots, p_{1,n-1}; \dots; p_{n,1}, \dots, p_{n,n-1}) = Y(\omega_i) \quad (23)$$

该式中变量仅包含状态转移概率,  $Y(\omega_i)$  可由过程离散时域尖度因子函数和过程一阶矩通过式(11)和式(13)获得。综合式(23)以及  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{D}$  性质, 可得以状态转移概率为变量的  $n$  元高阶方程组式(24), 通过该方程组则可获得业务流过程状态转移矩阵  $\mathbf{P}$ 。

$$\left. \begin{aligned} f_{Y(\omega_1)}(p_{1,n}, \dots, p_{1,n-1}; \dots; p_{n,1}, \dots, p_{n,n-1}) = Y(\omega_1) \\ \vdots \\ f_{Y(\omega_i)}(p_{1,n}, \dots, p_{1,n-1}; \dots; p_{n,1}, \dots, p_{n,n-1}) = Y(\omega_i) \\ \sum_{j=1}^n p_{i,j} = 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

根据以上分析, 将其中业务流过程离散时域尖度因子函数和业务流均值以所测得无线信道服务过程离散时域尖度因子函数值  $MZ(\mu)$  和无线信道服务过程一阶矩  $Em_1$  代换。则可等效获得类似式(24)的无线信道马尔科夫状态转移矩阵求解方程组式(25)。

$Ep_{i,j}$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, 6\}$  表示由本文算法所求得无线信道服务过程状态转移概率, 并依据参考文献[5], 设定无线信道为 6 种状态, 则和类似获得服务过程状态转移矩阵求解方程组式(25)。对该方程组采用数值分析法可求得服务过程状态转移矩阵, 从而实现无线信道建模, 同时所构建模型等效无线信道突发特性。虽然本文所提出无线信道建模方法是以 AMC 无线信道为背景, 但容易得知该方法对呈现马尔科夫过程特性的无线信道建模都是有效的。

$$\left. \begin{aligned} f_{Y(\omega_1)}(Ep_{1,1}, \dots, Ep_{1,5}; \dots; Ep_{6,1}, \dots, Ep_{6,5}) &= Y(\omega_1) \\ &\vdots \\ f_{Y(\omega_{30})}(Ep_{1,1}, \dots, Ep_{1,5}; \dots; Ep_{6,1}, \dots, Ep_{6,5}) &= Y(\omega_{30}) \\ \sum_{j=1}^6 Ep_{i,j} &= 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, 6\} \end{aligned} \right\} (25)$$

#### 4 数值分析

本文以 MATLAB 为仿真工具, 仿真环境设置如下, 无线信道为瑞利衰减信道, 该信道通过将 Nakagami- $m$  信道参数  $m$  设置为 1 产生<sup>[21]</sup>。缓存最大容量为  $b_N = 10$  个数据包, 数据包长为 1080 bit, 物理层 AMC 技术采用表 1 所示模式, 帧持续时间  $T_f = 2$  ms, AMC 参数  $b = 2$ , 多普勒频率  $f_d = 10$  Hz, 即,  $f_d T_f = 0.02$ , 并假定信道接收端服务服从指数分布, 突发特性以式(7)离散时域尖度因子函数表示。以文献[5]中方法搜索 AMC 门限值  $\{\gamma_n^m\}_{n=0}^{m-1}$ , 并构建 AMC 无线信道状态转移概率矩阵。仿照文献[4], 层间接口缓存所到达业务流  $A_i$  根据离散批量马尔科夫过程(discrete Batch Markovian Arrival Process, BMAP)产生, 定义其为 6 种状态  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , 其状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}_A$  如式(26)所示<sup>[4]</sup>, BMAP 过程能够很好地捕获到达业务流的突发特性。

表1 卷积编码调制传输模式

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
调制模式	BPSK	QPSK	QPSK	16QAM	64QAM
码率 $R_c$	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4
$R_n$ (bit/symbols)	0.50	1.00	1.50	3.00	4.50
$a_n$	274.7229	90.2514	67.6181	53.3987	35.3508
$g_n$	7.9932	3.4498	1.6883	0.4765	0.0900
$\gamma_{p_n}$ (dB)	-1.5331	1.0942	3.9772	10.2488	15.9784

$\mathbf{P}_A =$

$$\begin{bmatrix} 0.1927 & 0.0659 & 0.2264 & 0.1874 & 0.1606 & 0.1670 \\ 0.2457 & 0.1483 & 0.1316 & 0.2602 & 0.2055 & 0.0086 \\ 0.0357 & 0.2689 & 0.2248 & 0.1842 & 0.2087 & 0.0778 \\ 0.3662 & 0.3868 & 0.0569 & 0.0143 & 0.1573 & 0.0185 \\ 0.2248 & 0.0560 & 0.1499 & 0.3018 & 0.2330 & 0.0345 \\ 0.0249 & 0.2481 & 0.2341 & 0.2387 & 0.0438 & 0.2105 \end{bmatrix} \quad (26)$$

仿真分别就本文第 2 部分所定义系统状态 1( $S_1$ )和系统状态 2( $S_2$ )分析无线信道服务过程所呈现的突发特性特点。图 2 到图 4 分别表示系统处于  $S_1$  和

$S_2$  时, 信道服务过程突发特性与信道接收端服务速率  $\mu$ 、系统期望包差错率  $P_0$  以及信道平均信噪比  $\bar{\gamma}$  时关系。自图中可明显看出, 无论系统处于  $S_1$  还是  $S_2$ , 信道服务过程突发特性均随信道接收端服务速率  $\mu$ , 系统期望包差错率  $P_0$  或信道平均信噪比  $\bar{\gamma}$  增大而下降。信道服务过程突发特性随  $\mu$  增大而下降的趋势与文献[17,18,20]中结论是一致的; 而信道服务过程突发特性随  $P_0$  和  $\bar{\gamma}$  增大而下降的趋势表明, 随着系统期望包差错率或信道平均信噪比增大, 系统发送数据过程更加平稳, 突发特性呈下降趋势, 该现象与物理系统实际情况相吻合。

综合图 2 到图 4 数值分析结果, AMC 无线信道服务过程呈现突发特性特点, 并且其突发特性受无线信道接收端服务速率  $\mu$ 、系统期望包差错率  $P_0$  以及信道信噪比影响, 呈现单调变化特性, 从而表明本文第 2 节所提出突发特性等效无线信道建模方法的可行性。为验证本文所提出无线信道建模方法的有效性, 以文章第 2 节方法构建仿真环境下的 AMC 无线信道服务过程模型, 采用式(7)计算其突发特性后, 能够采用本文所提出突发特性等效模型构建方法等价构建 AMC 无线信道模型, 从而验证了本文所提出模型构建方法的有效性。本文所提出无线信道建模方法虽然是以 AMC 无线信道为背景, 但该方法对呈现马尔科夫过程特性的信道都是有效的, 为表述方便, 此处以简单的二状态信道为例验证信道建模方法的有效性。 $p_{12}$ ,  $p_{21}$  分别表示信道自状态 1 到状态 2 和自状态 2 到状态 1 的状态转移概率, 不同  $(p_{12}, p_{21})$  组合对应不同状态的无线信道系统, 以文献[5]或文献[7]方法构建原始无线信道模型, 其状态转移概率标记为实际状态转移概率。并在假定能够准确测量获得每一状态均值、过程均值和离散时域尖度因子函数情况下, 通过文章第 3 节所提出的 AMC 无线信道突发特性等效建模方法对其建模, 所求得状态转移概率标记为估计所得状态转移概率值, 图 5 表示了所构建模型与原模型的一致性(图中以文献[5]或文献[7]方法所获得无线信道状态转移概率标记为实际状态转移概率  $p_{12}$  和  $p_{21}$ , 以本文所提出建模方法求得状态转移概率标记为估计所得状态转移概率值  $p'_{12}$  和  $p'_{21}$ ), 从而证明了本文所提出的无线信道建模方法的有效性。

文献[7]构建 AMC 无线信道模型时, 假定无线信道为瑞利慢衰落信道, 信道状态转移仅发生在相邻状态下, 其算法计算复杂度为模型状态数  $n$  的 2 次幂, 即  $O(n^2)$ , 但文献[7]算法中存在大量的积分运算, 随着无线信道模型精确性增加, 积分运算复

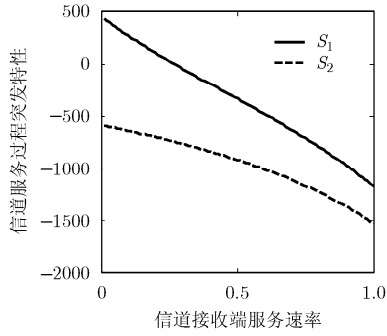


图 2  $P_0 = 0.2$ ,  $\bar{\gamma} = 20$  dB 时, AMC 无线信道服务过程突发特性与信道接收端服务速率  $\mu$  关系

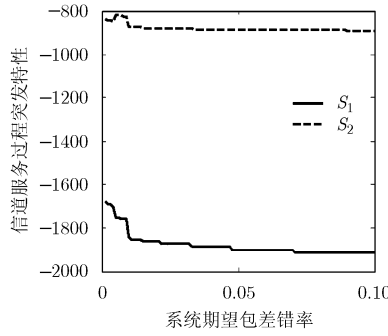


图 3  $\mu = 0.4$ ,  $\bar{\gamma} = 20$  dB 时, AMC 无线信道服务过程突发特性与系统期望包差错率  $P_0$  关系

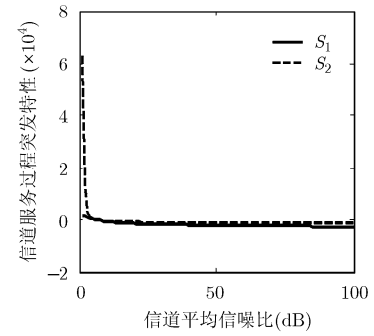


图 4  $\mu = 0.03$ ,  $P_0 = 0.2$  时, AMC 无线信道服务过程突发特性与信道信噪比关系

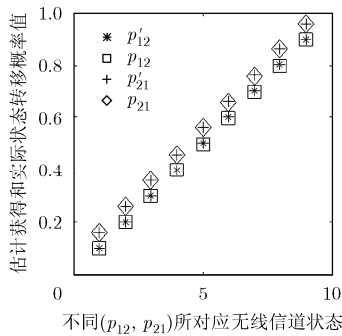


图 5 AMC 无线信道突发特性等效建模有效性

杂度会增加, 求解十分困难, 同时文献[7]算法假设无线信道状态转移仅发生在相邻状态, 但实际物理信道状态不仅会在相邻状态转移, 而且会在非相邻状态转移。文献[5]算法以 2 维嵌入马尔科夫链构建 AMC 无线信道模型, 此时信道状态转移不仅发生在相邻状态, 其计算复杂度同样为  $O(n^2)$ , 但文献[5]算法在求解状态转移概率时需要极其复杂的积分运算, 并且其复杂性与信道模型复杂程度有关。而由式(25)可知, 本文所提出突发特性等效建模方法计算复杂度同样为  $O(n^2)$ , 但本文算法使用代数方程, 而且代数方程的建立是基于测量参数  $MZ(\mu)$  和  $Em_1$ , 与信道模型复杂度无关, 仅与所构建信道模型状态数有关, 从而使得其计算复杂度降低。同时, 本文所提出构建信道模型方法能够体现对系统服务质量形成关键影响的信道服务过程突发特性, 所构建模型突发特性与信道服务所表现出的突发特性是等价的。

### 5 结束语

AMC 无线信道服务过程受业务流、物理层调制编码技术及无线信道环境影响。本文将数据链路层与物理层接口抽象为先进先出缓存, 以队列分析方法构建 AMC 无线信道服务过程模型; 并采用突发

特性的离散时域尖度因子函数法表示无线信道服务过程突发特性, 提出一种突发特性等效的无线信道建模方法, 该方法相对于文献中 AMC 无线信道的马尔科夫模型建模方法具有较低计算复杂度; 本文通过数值方法分析了 AMC 无线信道所呈现的突发特性特点, 从而验证了所提出无线信道建模方法的有效性。基于该突发特性等效方法的无线信道马尔科夫模型的降维建模, 以及系统 QoS 性能分析是下一步的研究课题之一。

### 参考文献

- [1] Al-Oudat N and Govindarasu M. QoS and security aware allocation of directed acyclic graph on heterogeneous distributed real-time systems[C]. 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Maui, Hawaii, USA, 2012: 50-56.
- [2] Wang N and Gulliver T. Cross layer AMC scheduling for a cooperative wireless communication system over nakagami- $m$  fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(6): 2330-2341.
- [3] Jun Nishioka and Tomohiko Yagyū. Availability constrained traffic control for AMC-enabled wireless mobile backhaul networks[C]. World Telecommunications Congress (WTC), Miyazaki, Japan, 2012: 1-6.
- [4] Le L B, Hossain E, and Alfa A S. Radio link level performance evaluation in wireless networks using multi-rate transmission with ARQ-based error control [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(10): 2647-2653.
- [5] Femenias G, Ramis J, and Carrasco L. Using two-dimensional Markov models and the effective-capacity approach for cross-layer design in AMC/ARQ-based wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(8): 4192-4203.
- [6] Zheng K, Wang Y, Lei L, et al. Cross-layer queuing analysis on multi-hop relaying networks with adaptive modulation

- and coding[J]. *IET Communications*, 2010, 4(3): 295-302.
- [7] Liu Qing-wen, Zhou Sheng-li, and Giannakis G B. Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: cross-layer analysis and design[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 1142-1153.
- [8] Gursoy Mustafa Cenk. On the capacity of training-based transmissions with input peak power constraints [C]. IEEE International Conference on Communications, Beijing, China, 2008: 1282-1286.
- [9] Zhou Yi-feng, Li Jun, Lamont L, *et al.* Modeling of packet dropout for UAV wireless communications[C]. International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012: 677-682.
- [10] Ngallema H, Ajib Wessam, and Elbiaze Halima. Dynamic spectrum access analysis in a multi-user cognitive radio network using markov chains [C]. International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Maui, Hawaii, USA, 2012: 1113-1117.
- [11] Hassan Syed Ali and Ingram Mary Ann. A quasi-stationary Markov chain model of a cooperative multi-hop linear network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(7): 2306-2315.
- [12] De Rango F, Fiore V, and Salvatore M. Channel modeling approach based on the concept of degradation level discrete-time Markov chain: UWB system case study[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(4): 1098-1107.
- [13] Turin W and Van N R. Hidden Markov modeling of flat fading channels[J]. *IEEE Journal Selected on Areas Communications*, 1998, 16(9): 1809-1817.
- [14] Turin W and Zorzi M. Performance analysis of delay-constrained communications over slow Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 801-807.
- [15] Amal E and Cioffi J M. Effect of wireless channel process on queuing delay-approximate analysis using peakedness function[C]. IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, 2005: 468-472.
- [16] Nikitin Alexei V. On the Impulsive nature of interchannel interference in digital communication systems [C]. 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Phoenix, AZ, American, 2011: 118-121.
- [17] Molnar S and Miklos Gy. Peakedness characterization in teletraffic[C]. PICS'98 Proceedings of the IFIP TC6/WG6.3 Seventh International Conference on Performance of Information and Communication Systems, Tsukuba Science City, Japan, 1996: 1-14.
- [18] Mark Brian I, Jagerman David L, and Ramamurthy G. Peakedness measures for traffic characterization in high-speed networks[C]. Proceedings of the 16th IEEE Annual Conference on Computer Communications, Kobo, Japan, 1997: 427-435.
- [19] Heffes H and Holtzman J M. Peakedness of traffic carried by a finite trunk group with renewal input[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1973, 52(9): 1617-1642.
- [20] Jagerman David L and Melamed Benjamin. Burstiness description of traffic streams: indices of dispersion and peakedness[C]. The Conference on Information Science and System, Princeton, New Jersey, 1994, 1: 24-28.
- [21] 张力军, 张宗橙, 郑宝玉, 等. 数字通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 34-34.  
Zhang Li-jun, Zhang Zong-cheng, Zheng Bao-yu, *et al.* Digital Communication[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 34-34.
- 房曙光: 男, 1970年生, 讲师, 博士生, 研究方向为无线网络优化及 QoS 保障技术.
- 董育宁: 男, 1955年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为泛在异构无线/IP 网络中的多媒体传输、QoE/QoS 建模、跨层优化、绿色通信、网络流识别、图像和视频信息的处理等方面的关键技术及其应用.
- 张 晖: 男, 1982年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为下一代无线泛在网络、异构融合 Mesh 网络以及云计算技术.