

# 基于 CTMC 和状态空间模型的宽带无线接入网的 QoS 性能研究

赵海军<sup>1</sup>, 崔梦天<sup>2</sup>, 李明东<sup>1</sup>, 何先波<sup>1</sup>

(1. 西华师范大学计算机学院, 四川南充 637009; 2. 西南民族大学计算机科学与技术学院, 四川成都 610041)

**摘要:** 为了实现同一地域范围内的众多用户在有限带宽条件下提出的高 QoS 要求, 本文对基于 IEEE 802. 16 标准的宽带无线接入网中数据包级 QoS (Quality of Service) 性能进行了研究. 具体做法是, 首先采用批马尔可夫到达过程 (BMAP, Batch Markov Arrival Process) 和连续时间马尔科夫链 (CTMC, Continuous Time Markov Chain) 对到达过程和流量源进行建模, 得到更符合实际和更准确的排队模型; 然后基于状态空间, 对一个无线接入网络系统进行建模, 通过对得到的系统模型并结合前面得到的排队模型的深入分析, 从而获得该模型下的各项 QoS 性能指标, 如平均队列长度、丢包率、队列吞吐量和平均包时延. 仿真实验结果表明, 本文提出的算法模型相比于其他典型的算法模型, 能够使各项 QoS 性能指标有较大的改善和提高.

**关键词:** 连续时间马尔科夫链; 状态空间模型; 宽带无线接入网; IEEE 802. 16 标准; 服务质量

**中图分类号:** TN929. 5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2018)04-0783-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.04.003

## The Research on QoS Performance of Broadband Wireless Access Network Based on CTMC and State Space Model

ZHAO Hai-jun<sup>1</sup>, CUI Meng-tian<sup>2</sup>, LI Ming-dong<sup>1</sup>, HE Xian-bo<sup>1</sup>

(1. School of Computer, China-West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China;

2. School of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** In order to achieve the high QoS requirements demanded by many users in the same geographic area in a finite bandwidth case, the performance of providing packet-level QoS in the broadband wireless access network based on the IEEE 802. 16 standard is studied in this paper. In practice, firstly, the arrival process and the traffic source is modelled by Batch Markov Arrival Process and Continuous Time Markov Chain and the more practical and more accurate queuing model is achieved. Then, based on the state space, a wireless access network system is modeled. By the in-depth analysis for the obtained system model and the queuing model achieved previously, the QoS performance metrics about this model, such as the average queue length, packet dropping probability, the queue throughput and the average packet delay, are obtained. The simulation results show that the proposed analytical model in this paper can improve and enhance the QoS performance metrics compared with other typical analytical models.

**Key words:** continuous time Markov chain; state space model; broadband wireless access network; IEEE 802. 16 standard; Quality of Service

### 1 引言

IEEE 802. 16 标准网络使得高速移动的互联网接入无处不在, 满足了日益增长的用户需求. 作为 IEEE

802. 16 在 2004 年颁布的第一个标准-全球微波接入互操作 (WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access)<sup>[1]</sup> 能够为各种多媒体业务如视频流、VoIP 和 FTP 等提供无线宽带通信.

收稿日期: 2016-10-03; 修回日期: 2017-02-19; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61379019); 西华师范大学基本科研业务费专项基金 (No. 14C002); 四川省科技厅支撑项目 (No. 2014SZ0104); 南充市科技支撑项目 (No. 15A0068)

WiMAX 提出了一个非常具有挑战性的多用户 QoS 通信问题,即在同一地域范围内的众多用户在有限的带宽条件下获得高的数据速率,同时又能保证低时延.虽然多址接入技术可以通过分配给每个用户总系统资源的一部分来实现不同用户共享可用带宽,但由于 WiMAX 业务的多样性和在系统调度方面具有的挑战性,所以使得 WiMAX 中的多址接入问题也变得相当复杂.

WiMAX 标准定义了 2 种操作模式来共享无线媒质:点对多点和网络.点对多点模式采用蜂窝结构,在这种模式下,用户站(SS, Subscriber Station)分布在中心基站(BS, Base Station)周围的蜂窝.数据传输有 2 个方向:下行链路(从 BS 到 SS)和上行链路(从 SS 到 BS),从 SS 到 BS 的传输要由 BS 进行协调;而在网络模式下,节点被组织成 AdHoc 网络,而且在它们之间的调度是采用分布式方式.

WiMAX 标准定义了物理层规范和介质访问控制(MAC, Medium Access Control)信令机制. IEEE 802. 16 采用 2 种调制系统:正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiple)<sup>[2,3]</sup>和正交频分多址(OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)<sup>[4]</sup>. OFDMA 即扩展的 OFDM 在同一时间、同一信道中能容纳多个用户,已被 IEEE 802. 16 用作为宽带无线网络中的物理层传输技术.

对于无线移动网络来说,关于数据包级的 QoS 问题得到了相当广泛的研究.为了保证实时业务流的质量,并为其他业务类型提供更多的传输机会,一种针对多业务类型的自适应带宽分配(ABA, Adaptive Bandwidth Allocation)模型在 IEEE 802. 16 的 WiMAX 网络中得到了研究<sup>[5]</sup>.文献[6~8]采用数学工具研究了采用 2 个连接接纳控制方案模型的连接级和数据包级的 QoS 性能参数,这种方案通常在单个蜂窝的 IEEE 802. 16 环境中采用.文献[9]针对组合服务 QoS 需求的全局性和服务 QoS 状态监控的局部性之间的矛盾使得组合服务的可用性难以满足用户的需求,提出了组合服务的自适应框架,重点研究了全局 QoS 分配与服务的 QoS 状态监控机制.实验表明,通过 QoS 阈值预测和松弛系数的使用能够实现以较小的自适应开销适应环境变化满足用户端到端的 QoS 需求,从而提高组合服务的可用性.文献[10]基于调度机制提出了 2 种方案,可以有效地降低实时突发流量的时延,并对实时突发流量在时延、带宽利用率和吞吐量等方面与 Round Robin 调度方案进行了比较.文献[11]基于 IEEE 802. 16 的 MAC 层架构体系,通过分析其 QoS 相关保障机制,提出了一种适合于 WiMAX 系统 MAC 层的基于预留的动态补偿算法,并采用两级调度架构,引入各业务流间的动态补偿

机制,实现业务流调度的长期公平性,调度算法在公平性、时延、系统带宽利用率等方面具有一定的优势.文献[12]基于 STBC 方案,针对 MIMO OFDM 通信系统中同时存在发射机和接收机 I/O 不平衡、前端滤波器失配、CFO 和频率选择性信道失真的组合影响进行了深入研究,并提出了一适用的联合均衡策略.仿真结果表明,提出的频域子载波均衡技术不仅能扩展到其他高阶 STBC 系统,而且使均衡后的系统 BER 性能得到了明显提高.文献[13]针对无线信道提出了一种数据传输系统,在这种系统中,数据包在发送端进行排队,并采用马尔可夫近似,研究了由于缓冲溢出造成的丢包过程的统计特性.文献[14]考虑了点对点无线传输,并提出了一种分析模型框架来计算链路层数据包发送时延统计特性.文献[15]针对无线网络中的多类数据服务提出了一种自适应跨层调度机制.调度机制采用排队信息,并结合物理层参数,从而获得需要的 QoS 性能.在数据包级 QoS 约束条件下的 TDMA 和基于 CDMA 的宽带蜂窝无线系统的容量在文献[16]中得到了研究.文献[17]提出了一种数学模型来研究信道接入参数、带宽配置和背驮式策略对性能的影响,也考虑了物理突发性和非饱和流量的影响.从其仿真结果可以看出,如果随机信道接入带宽能够根据信道接入参数、背驮式策略和网络流量进行合理配置,则带宽利用率就可以得到提高.文献[18]提出了一种应用于异构无线网络环境的基于多目标优化的业务接入控制算法.该算法以业务占用总资源最少、业务阻塞率最低和网络间负载最均衡为目标建立了多目标优化控制模型,采用高斯和戒上型组合隶属函数将多目标问题模糊化,利用最大化满意度指标法将多目标问题转化为单目标问题,并通过遗传算法求得最优解.仿真结果表明,算法能保证业务接入的可靠性,并有效降低了业务阻塞率.

本文基于 IEEE 802. 16 标准的宽带无线接入网,对其数据包级的 QoS 性能指标进行了研究;由于 IEEE 802. 16 的输入流量具有自相似性和突发性,导致前后到达时间之间具有相关性,从而影响系统性能.本文首先采用批马尔科夫到达过程(BMAP, Batch Markov Arrival Process)和连续时间马尔可夫链(CTMC, Continuous Time Markov Chain)来对这种到达流量的相关性进行建模,提出了一种排队数学模型,并根据队列中的数据包数目来捕捉系统的动态性;然后结合 OFDMA 物理层的自适应调制和编码方案,提出了一种基于状态空间的分析模型来研究 IEEE 802. 16 宽带无线接入网络的数据包级的 QoS 性能;最后得到了基于该模型的各种性能参数如平均队列长度、由于缓冲空间不够造成的丢包率、队列吞吐量以及平均排队时延.仿真实验结果表明,本文提出的算法模型能够确保这些 QoS 性能指标

大为改善和提高.

## 2 IEEE 802.16 网络的相关标准

本文考虑 IEEE 802.16 的一个点对点无线模式,这时 BS 给一组 SS 提供服务;下行链路信道采用广播模式,但每个 SS 仅要求处理自己的数据;在上行链路子帧中,SS 采用时分多址(TDMA, Time Division Multiple Access)方式发送数据给 BS;下行链路和上行链路子帧采用下列技术之一的双工模式:频分双工(FDD, Frequency Division Duplex),这时下行链路和上行链路子帧同时采用不同的频率;时分双工(TDD, Time Division Duplex),这时下行链路和上行链路子帧分别占用不同的时间,通常共享相同的频率;SS 可以为全双工或半双工.

IEEE 802.16e 采用面向连接的介质访问控制(MAC, Medium Access Control)协议,这种协议提供了一种机制作为 SS 向 BS 请求带宽. IEEE802.16e MAC 支持 2 类 SS:基于连接授予(GPC, Grant Per Connection)和基于 SS 授予(GPSS, Grant Per SS). 在 GPC 情况下,基站单独为每个业务分配带宽,不管这些业务是否属于同一个用户;而对于 GPSS,则是由基站将带宽分配给每个用户站,再由每个用户站来为其所承载的各个业务分配带宽<sup>[9]</sup>.

基于 IEEE 802.16 标准的 WiMAX 定义了 5 类业务流量<sup>[1,19]</sup>,分别代表不同的服务类型,分别是:主动授予服务(UGS, Unsolicited Grant Service)、扩展实时轮询服务(ertPS, Extended Real Time Polling Service)、实时轮询服务(rtPS, Real Time Polling Service)、非实时轮询服务(nrtPS, Non-Real Time Polling Service)和尽力而为服务(BE, Best Effort Service). 每类服务在介质访问控制层都有自己的 QoS 机制来支持不同的应用. UGS 是为周期性地生成固定大小数据包而设计的,支持实时业务流,如没有进行静默压缩的 IP 语音业务 VoIP;ertPS 支持实时应用,周期性地生成可变大小的数据包,要求有保证的数据速率和静默压缩延迟;rtPS 支持生成周期性变长分组数据的实时业务流;nrtPS 支持可容忍的延迟数据流,这种数据流具有更多突发性,如 FTP,通常情况下,nrtPS 可以容忍更大的延迟,而且对延迟抖动不敏感,但需要一个最小吞吐量;BE 支持没有 QoS 要求的流量,如电子邮件,因此可以基于可用资源进行处理.

## 3 基于 BMAP 和 CTMC 的排队模型

### 3.1 马尔可夫模型及马尔可夫链

马尔可夫模型(Markov Model)是一种统计模型,广泛应用于语音通信识别和概率文法等各个工程技术领域. 经过长期发展,尤其是在语音通信识别中得到了成功应用,使它成为一种通用的统计工具;在概率论中,马

尔可夫模型扩大了大数律和中心极限定理的应用范围;马尔可夫最重要的工作是提出并研究了一种能用数学分析方法研究自然过程的一般图式—马尔可夫链,同时开创了对一种无后效性的随机过程—马尔可夫过程. 试验发现表明,一个系统的状态转换过程中第  $n$  次转移获得的状态常决定于前一次(第  $n-1$  次)的结果. 对于一个系统,由一个状态到另一个状态的转移过程中,存在着转移概率,并且这种转移概率可以依据其紧接的前一种状态得出,与该系统的原始状态和此次转移前的马尔可夫过程无关,这主要基于马尔可夫假设:

(1) 设  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_t)$  是随机变量序列,其中每个随机变量的取值在有限集  $\mathbf{S} = \{s_1, \dots, s_n\}$ ,  $\mathbf{S}$  称为状态空间或状态集合;

(2) 如果  $\mathbf{X}$  具有这些特征,那么这个随机变量序列就成为一个马尔科夫过程(链). 马尔科夫模型通常用一个形式化表示,一个马尔科夫模型通常是一个 3 元组  $(\mathbf{S}, \Pi, \mathbf{A})$ ,其中  $\mathbf{S}$  是状态的集合即状态空间,  $\Pi$  是初始状态的概率,  $\mathbf{A}$  是状态间的转移概率,根据转移概率可以得出状态转移矩阵等. 经过多年来的发展,人们把马尔科夫过程应用于排队理论,从此出现批马尔科夫到达过程(BMAP, Batch Markov Arrival Process),同时又提出了连续时间马尔可夫链(CTMC, Continuous Time Markov Chain)和离散时间马尔可夫链(DTMC, Discrete Time Markov Chain),这些都分别应用于不同的领域<sup>[20,21]</sup>.

### 3.2 基于 BMAP 和 CTMC 的排队模型

为了捕捉到达过程流量,本文采用 BMAP. 在 BMAP 中,到达过程用具有有限状态空间  $\{0, 1, \dots, S\}$  的不可约连续时间马尔可夫链(CTMC, Continuous Time Markov Chain)来表示,状态  $s$  的 CTMC 逗留时间是参数为  $\lambda_s$  的指数分布. 在逗留时间结束后,具有概率  $p_0(s, s')$  的链跳转到不生成数据包的状态  $s'$ ,同时具有概率  $p_k(s, s')$  的链跳转到状态  $s'$ ,并生成一个由  $k$  个数据包构成的批组( $k \geq 1$ ). 概率满足条件: $p_0(s, s) = 0$ ,全部输出转移的概率之和必须等于 1,即:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{s'=0}^S p_k(s, s') + \sum_{s'=0, s' \neq s}^S p_0(s, s') = 1 \quad (1)$$

$$0 \leq s \leq S$$

BMAP 是在状态空间  $\{(i, j) / i \geq 0, 0 \leq j \leq S\}$  上的一个二维马尔科夫过程  $\{A(t), J(t)\}$ ,这个状态空间由无穷小生成算子给出如下:

$$\psi = \begin{bmatrix} D_0 & D_1 & D_2 & D_3 & \cdots \\ 0 & D_0 & D_1 & D_2 & \cdots \\ 0 & 0 & D_0 & D_1 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & D_0 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中矩阵  $\mathbf{D}_0 = [D_{ss'}]$  ( $0 \leq s \leq S, 0 \leq s' \leq S$ ) 有负的对角元素, 而且非负的对角元素为:

$$D_{ss'} = \begin{cases} -\lambda_s, & s' = s \\ \lambda_s p(s, s'), & s' \neq s \end{cases} \quad (3)$$

$k > 0$  时的矩阵  $\mathbf{D}_k$  由下式确定:

$$\mathbf{D}_k = [D_{k,ss'}] \quad (4)$$

$$0 \leq s \leq S, 0 \leq s' \leq S, k > 0$$

式中

$$D_{k,ss'} = \lambda_s p_k(s, s') \quad (5)$$

$$0 \leq s \leq S, 0 \leq s' \leq S, k > 0$$

矩阵  $\mathbf{D} = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{D}_k$  为不可约无穷小生成算子. 这里假设  $\mathbf{D}_k \neq \mathbf{D}_0$ , 以保证到达一定出现.

变量  $A(t)$  为  $[0, t]$  期间到达的数目, 变量  $J(t)$  表示到达过程的时段.

采用生成算子  $\mathbf{D}$  的 CTMC 稳态概率向量  $\boldsymbol{\pi}_{\text{BMAP}}$  计算如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\pi}_{\text{BMAP}} \cdot \mathbf{D} = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\pi}_{\text{BMAP}} \cdot \mathbf{e} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{0}$  和  $\mathbf{e}$  分别为由 0 构成的行向量和由 1 构成的列向量.

由 BMAP 得到的平均稳态到达率为:

$$\lambda_{\text{BMAP}} = \boldsymbol{\pi}_{\text{BMAP}} \sum_{k=1}^{\infty} k \mathbf{D}_k \cdot \mathbf{e} \quad (7)$$

在一个时隙间隔  $T$  内, 具有平均到达率  $\lambda_s$  的  $a$  个到达数据包的概率  $f_a(\lambda_s, T)$  ( $a = 0, 1, \dots, A, A$  为最大数据包数量) 为:

$$f_a(\lambda_s, T) = \frac{e^{-\lambda_s T} (\lambda_s T)^a}{a!} \quad (8)$$

必须满足条件  $\sum_{a=1}^{+\infty} [e^{-\lambda_s T} (\lambda_s T)^a / a!] < er \quad \forall s$ , 式中  $er$  为充分小的数.

在时隙间隔  $T$  内, 具有平均到达率  $\lambda_s$  的、具有参数  $a$  的泊松到达出现的概率由大小为  $S \times S$  的对角阵  $\boldsymbol{\xi}_a$  给出,  $\boldsymbol{\xi}_a$  定义为:

$$\boldsymbol{\xi}_a = \begin{bmatrix} f_a(\lambda_1, T) & & & \\ & f_a(\lambda_2, T) & & \\ & & \ddots & \\ & & & f_a(\lambda_s, T) \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### 4 基于状态空间的分析模型

考虑如图 1 所示的无线接入网络系统. 连接在 1 个 BS 和多个 SS 之间建立, 采用 TDMA/TDD 接入模式, 使用单载波空中接口, 每个 SS 为多个连接提供服务; 对 SS 中的每个连接来说, 一个单独队列的数据包大小为  $X$ ; 考虑一个 GPC 类型的 SS, 因此在带宽分配期间, 就

可以通过 SS 为每个连接预留一定数量的带宽.

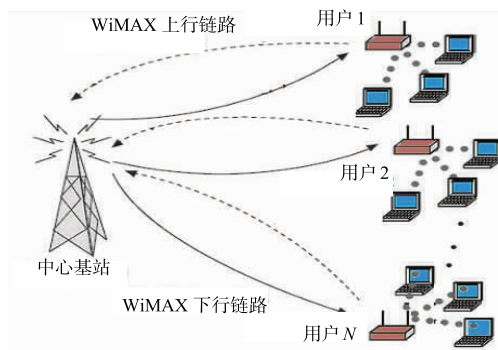


图1 无线接入网络系统

#### 4.1 状态空间模型

在每帧开始时观察队列的状态, 连接  $i$  被分配  $b$  个单位的带宽, 在帧周期  $f$  间到达的数据包, 直至帧周期  $f + 1$  开始时才被传输, 则队列的状态空间模型可以定义如下:

$$\mathbf{E} = \{(x, s); 0 \leq x \leq X, 1 \leq s \leq S\} \quad (10)$$

式中  $x, s$  分别表示队列中的数据包数量和 BMAP 到达过程的不可约连续时间马尔可夫链状态.

#### 4.2 队列转移矩阵

根据 3.2 小节分析和马尔可夫模型理论, 队列转移矩阵  $\mathbf{M}$  如下:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{0,0} & m_{0,1} & \cdots & m_{0,A} & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & \\ m_{D,0} & m_{D,1} & \cdots & m_{D,D} & \cdots & m_{D,D+A} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & m_{X-A,X-A-D} & \cdots & \cdots & \cdots & m_{X-A,X} \\ & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & m_{X,X-D} & & m_{X,X} \end{bmatrix} \quad (11)$$

矩阵  $\mathbf{M}$  的行表示队列中数据包的数目, 矩阵中的元素  $m_{x,x'}$  表示队列中数据包的数目从当前帧的  $x$  变化到下一帧的  $x'$  时的转移概率; 此外, 在一帧时间内, 可以进入或离开队列的数据包的最大数目分别用  $A$  和  $D$  表示.

在一个时隙内, 传输的数据包的最大数目由  $D' = \min(x, D)$  给出. 因此, 如果  $k$  表示成功传输的数据包的数目, 则在一个时隙内, 成功传输  $k$  个数据包的概率就可以通过矩阵  $\mathbf{T}_k$  得到,  $\mathbf{T}_k$  定义如下:

$$\mathbf{T}_k = \begin{cases} \binom{x}{k} (1-\theta)^k \theta^{x-k}, & k < D' \\ \sum_{j=U}^x \binom{x}{j} (1-\theta)^j \theta^{x-j}, & k = D'' \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\theta$  为 1 个数据包成功传输的概率.

矩阵  $\mathbf{M}$  中的元素可以得到如下:

$$m_{x,x-u} = \psi \times \sum_{k-a=u} \xi_a \times T_k \quad (13)$$

$$m_{x,x+v} = \psi \times \sum_{a-k=v} \xi_a \times T_k \quad (14)$$

$$m_{x,x} = \psi \times \sum_{k=a} \xi_a \times T_k \quad (15)$$

对于  $u = 1, 2, \dots, D'$ ,  $v = 1, 2, \dots, A$ , 这时  $k \in \{0, 1, \dots, D'\}$ ,  $a \in \{0, 1, \dots, A\}$  分别表示离开的包数目和到达的包数目.

分别用  $m_{x,x-u}$ 、 $m_{x,x+v}$ 、 $m_{x,x}$  来表示队列中包数目增加  $u$ 、减少  $v$  和不变的概率.

矩阵  $\mathbf{M}$  其余的行  $\{x = X - A + 1, X - A + 2, \dots, X\}$  包括了由于队列空间不够, 一些可能被丢弃的数据包的情况, 这个概率计算如下:

$$m_{x,x+v} = \sum_{a=v}^A m'_{x,x+a} \quad x+v \geq X \quad (16)$$

这个概率包括没有被丢弃的数据包和当更多数据包到达而一个队列已满被丢弃的情况. 此外,  $\mathbf{M}$  的主对角的最后一个元素为:

$$m_{x,x} = m'_{x,x} + \sum_{a=1}^A m'_{x,x+a} \quad x = X \quad (17)$$

式中  $m'_{x,x}$  是在没有任何数据包丢弃的情况下得到的.

式(16)和(17)表明, 如果到达的数据包的数目大于队列的可用空间, 则该队列就是满的. 换言之, 满队列状态时的转移概率是使队列中数据包数目等于或大于队列大小  $X$  的全部概率的和.

### 4.3 QoS 性能指标

QoS 性能指标的计算采用系统稳定状态时的概率. 概率向量  $\boldsymbol{\pi}$  是通过求解系统  $\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{M} = \boldsymbol{\pi}$  和  $\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{1} = \mathbf{1}$  得到,  $\mathbf{1}$  是全部元素为 1 的列矩阵.

对于队列中有  $x \in \{0, 1, \dots, X\}$  个数据包的状态来说, 如果用  $\boldsymbol{\pi}(x, s)$  来表示这个状态时的稳态概率, 则这个稳态概率可以从矩阵  $\boldsymbol{\pi}$  得到如下:

$$\boldsymbol{\pi}(x, s) = [\boldsymbol{\pi}]_{X \times S} \quad s = 1, \dots, S \quad (18)$$

矩阵  $\boldsymbol{\pi}$  包含了对应的队列中数据包数目和不可约连续时间马尔可夫链的 BMAP 到达过程状态的稳态概率. 采用稳态概率, 就可以得到各种 QoS 性能指标.

#### 4.3.1 平均队列长度

传输队列中的包平均数目即平均队列长度计算如下:

$$\bar{X} = E(x) = \sum_{x=0}^X x \sum_{s=1}^S \boldsymbol{\pi}(x, s) \quad (19)$$

#### 4.3.2 丢包率

为了计算丢包率  $p_{\text{drop}}$ , 首先要得到每个时隙的丢包数目, 再采用每帧的平均丢包数目来得到丢包率. 如果  $x$  为队列中的包数目且这个数目增加  $n$  时, 则丢包数目  $X_{\text{drop}} = n - (X - x) \cdot f_{[X-n, \infty]}(x)$ , 这里:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } x \in A \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (20)$$

则每帧的平均丢包数量计算如下:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{\text{drop}} &= E(X_{\text{drop}}) \\ &= \sum_{x=0}^X \sum_{s=1}^S \sum_{n=X-x+1}^A \left( \sum_{l=1}^S [m_{x,x+n}]_{s,l} \right) \\ &\quad \cdot [n - (X - x)] \cdot \boldsymbol{\pi}(x, s) \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)中的项  $\sum_{l=1}^S [m_{x,x+n}]_{s,l}$  表示在每个到达过程队列中的包数目增加  $n$  时总的概率.

在计算出每帧的平均丢包数目后, 就可以得到到达包丢失的概率(即丢包率)如下:

$$p_{\text{drop}} = \frac{\bar{X}_{\text{drop}}}{\lambda_{\text{BMAP}}} \quad (22)$$

式中  $\lambda_{\text{BMAP}}$  为采用 BMAP 得到的平均稳态到达率.

#### 4.3.3 队列吞吐量

队列吞吐量用于衡量 1 帧中传输的数据包数目, 计算如下:

$$\phi = \lambda_{\text{BMAP}} (1 - p_{\text{drop}}) \quad (23)$$

#### 4.3.4 平均包时延

平均包时延定义为一个数据包到达队列中, 在被传输前等待的帧数目, 计算如下:

$$\bar{D} = \frac{\bar{X}}{\phi} = \frac{\bar{X}}{\lambda_{\text{BMAP}} (1 - p_{\text{drop}})} \quad (24)$$

式中  $\phi$  是吞吐量,  $\bar{X}$  是平均队列长度.

## 5 模型的 QoS 性能指标仿真及分析

针对本文所提出的算法模型, 采用 AMC, 设在一帧周期内可传输的数据包最大数目为 150/帧; 队列大小也假定为 150 个数据包(即  $X = 150$ ).

为简化计算, 假设批次的最大大小是 2, 决定 BMAP 的状态转换矩阵如下:

$$\begin{cases} D_0 = \begin{bmatrix} -2 & 1/2 \\ 1/8 & -1 \end{bmatrix} \\ D_1 = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/4 \\ 1/4 & 1/4 \end{bmatrix} \\ D_2 = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 \\ 1/4 & 1/8 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

假设每个状态的逗留时间分别服从速率  $\lambda_0 = 2$  和  $\lambda_1 = 1$  的指数分布.

仿真在 Opnet Modeler 8.1 网络仿真器的无线网络仿真环境中进行, 仿真中的对象模型、事件调度器、收/发天线、信道噪声模型及各种网络组件采用 C、C++ 和 Opnet Modeler 自带的核心函数来实现; 仿真中对本文提出的算法模型的 QoS 保证机制与文献[10, 11]提出的 QoS 保证机制算法模型在吞吐量、平均队列长度、平

均包时延和丢包率这些性能指标分别在不同流量强度情况下、在具有恒定流量强度的不同信道质量(由不同 SNR 决定的)情况下进行对比研究。

图 2 所示为 3 种算法模型得到的吞吐量随流量强度的变化关系曲线。从图 2 可见,当流量强度增加时,吞吐量都增大,直至饱和,这是由于数据包到达的速率超过信道质量允许的传输速率,所以导致饱和出现;从图 2 还可看到,基于本文提出的算法模型得到的吞吐量相比于文献[10,11]的算法模型得到的吞吐量要分别提高大约 22% 和 43%。

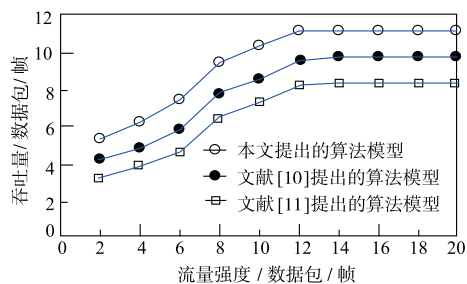


图 2 吞吐量与流量强度的关系

图 3、图 4 和图 5 分别为 3 种算法模型得到的平均队列长度、平均包时延和丢包率随流量强度的变化关系曲线。虽然 3 种算法模型得到的 3 个 QoS 性能指标都随着流量强度的增大而增大,但是从图 3、图 4 和图 5 可见,本文提出的算法模型仍然要优于其他 2 种算法模型;特别是从图 4 可见,本文提出的算法模型的平均包时延不仅比文献[10,11]的算法模型的平均包时延大大降低,而且平均包时延基本为一常数,这从根本上保证了对时延要求较高的业务流的稳定传输;而且从图 5 可见,本文提出的算法模型在一定的流量强度下(如流量强度小于 6 帧)不存在丢包情况,这对于实时突发业务流的传输来说是至关重要的。

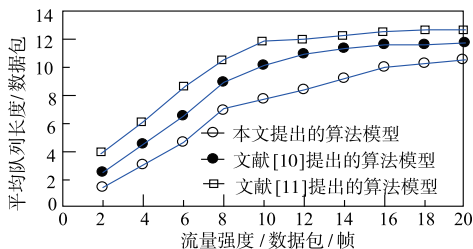


图 3 平均队列长度与流量强度的关系

图 6、图 7 和图 8 分别为平均队列长度、平均包时延和丢包率与信道质量的变化关系曲线。从图可见,这些参数随着信道质量的提高(平均信噪比 SNR 增大)而减小。而且从图 6、图 7 和图 8 可见,当平均 SNR 达到 22dB 左右时,本文提出的算法模型的队列长度基本不受影响,也不存在包时延和丢包情况发生,这是因为当信道质量提高时,发射机可以使用更高的调制电平和编码

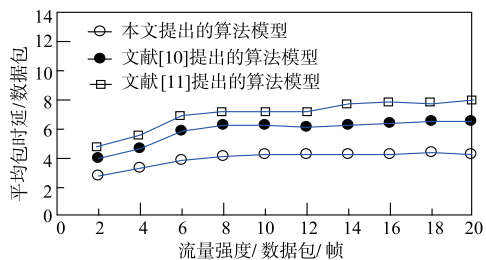


图 4 平均包时延与流量强度的关系

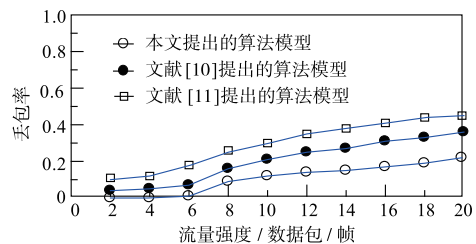


图 5 丢包率与流量强度的关系

速率来提高吞吐量。当然,随着信道质量的提高,传输速率足够高,可以满足大部分的到达流量,所以其他 2 种算法模型的性能指标也得到了较好的改善。

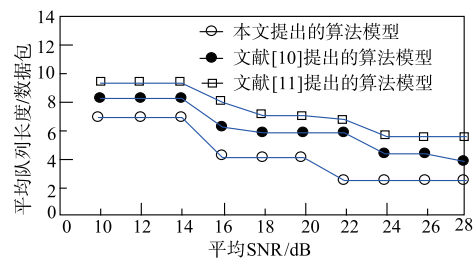


图 6 平均队列长度与信道质量的关系

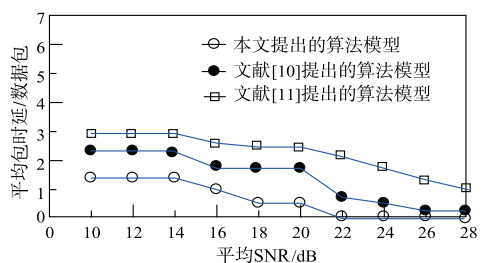


图 7 平均包时延与信道质量的关系

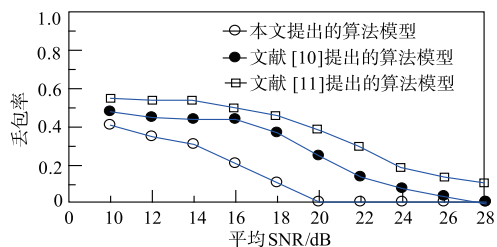


图 8 丢包率与信道质量的关系

## 6 结束语

本文首先基于连续时间马尔可夫链(CTMC)提出了一种排队模型,然后结合 OFDMA 物理层的自适应调制和编码方案,提出了一种基于状态空间的分析模型来研究 IEEE 802.16 宽带无线接入网络的数据包级的 QoS 性能;为了对到达过程和流量源进行建模,也采用了批马尔可夫到达过程,这可以使得建模更符合实际和更准确;最后对得到的 QoS 性能指标如平均队列长度、丢包率、队列吞吐量和平均包时延等进行了分析和对比研究.仿真结果表明,本文提出的算法模型能够确保这些 QoS 性能指标大为改善和提高.

### 参考文献

- [1] IEEE802.16 WG. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems[S]. IEEE802.16 Standard,2004.
- [2] 赵海军,崔梦天,李明东.数据驱动的频域回波抵消算法[J].通信学报,2006,27(6):134-140.  
ZHAO Hai-jun, CUI Meng-tian, LI Ming-dong. A sort of data driven frequency-domain echo-cancellation algorithm[J]. Journal on Communications, 2006, 27(6): 134-140. (in Chinese)
- [3] 代光发,王勤,王高峰,等. NC OFDM 系统旁瓣抑制中的可变速干扰抵消基函数设计[J].电子学报,2016,44(5):1156-1161.  
DAI Guang-fa, WANG Qin, WANG Gao-feng, et al. Variable cancellation basis for side-lobe suppression in non-contiguous OFDM systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1156-1161. (in Chinese)
- [4] CVIJETIC N, QIAN D Y, HU J Q, et al. Orthogonal frequency division multiple access PON (OFDMA-PON) for colorless upstream transmission beyond 10 Gb/s[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(6):781-790.
- [5] CHUN T C, SHIN K G. Analysis of adaptive bandwidth allocation in wireless networks with multilevel degradable quality of service[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(1):5-17.
- [6] EL-BOUCHTI A, HAQIQ A, EL-KAFHALI S. Analysis of quality of service performances of connection admission control mechanisms in OFDMA IEEE802.16 network using BMAP queuing[J]. International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), 2012, 9(2):302-310.
- [7] EL-BOUCHTI A, EL-KAFHALI S, HAQIQ A. Performance modeling and analysis of connection admission control in OFDMA based WiMAX system with MMPP queuing[J]. World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT), 2011, 1(4):148-156.
- [8] EL-BOUCHTI A, EL-KAFHALI S, HAQIQ A. Performance analysis of connection admission control scheme in IEEE802.16 OFDMA networks[J]. International Journal of Computer Science and Information Security, 2011, 9(3):45-51.
- [9] 刘志忠,彭辉,曹雷.面向全局约束的 QoS 分解与服务状态监控机制研究[J].电子学报,2016,44(4):886-892.  
LIU Zhi-zhong, PENG Hui, CAO Lei. Research on QoS decomposing and service status monitor for composite service with global QoS constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 886-892. (in Chinese)
- [10] NSOH S A, BENKOCZI R. Routing and link scheduling with QoS in IEEE 802.16 mesh networks[A]. Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) [C]. Shanghai, China: IEEE, 2013. 233-238.
- [11] 梁恒洲.基于 WiMAX 的 MAC 的层 QoS 保证机制及带宽调度算法研究[D].南京:南京邮电大学,2011.  
LIANG Heng-zhou. The Research of QoS Guarantee and Scheduling Algorithm of Bandwidth Allocation for WiMAX MAC Layer[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011. (in Chinese)
- [12] 赵海军,李敏,崔梦天,等.基于 STBC 的 MIMO OFDM 系统中的 I/Q 不平衡及 CFO 的联合均衡策略[J].通信学报,2013,34(11):51-58.  
ZHAO Hai-jun, LI Min, CUI Meng-tian, et al. Joint equilibrium strategy for I/Q imbalance and CFO in MIMO OFDM system based on STBC[J]. Journal on Communications, 2013, 34(11): 51-58. (in Chinese)
- [13] ZORZI M. Packet dropping statistics of a data-link protocol for wireless local communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 52(1):71-79.
- [14] AHMED I, BADIA L, PETLUND A. Analysis of SR ARQ delays using data-bundling over Markov channels[A]. Proceedings of 2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) [C]. Funchal, Portugal: IEEE, 2014. 1-6.
- [15] INDUMATHI G, MURUGESAN K. Diverse QoS support of multiclass data services using cross-layer scheduling[J]. The IUP Journal of Telecommunications, 2009, 1(1):37-53.
- [16] ALUMONA T, NWADIUKO O C, NNANNA L A, et al. Hybrid technique for enhancing quality of service in wireless network[J]. Advances in Networks, 2014, 2(1):1-6.
- [17] HE J H, YANG K, GUILD K, et al. On bandwidth request mechanism with piggyback in fixed IEEE802.16 networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,

- 2008,7(12):5238-5243.
- [18] 盛洁,马冬. 异构无线网络业务接入多目标优化控制算法[J]. 电子学报,2016,44(2):282-288.  
SHENG Jie, MA Dong. Multi-objective optimal based service access control algorithm for heterogenous wireless network[J]. Acta Electronica Sinica,2016,44(2):282-288. (in Chinese)
- [19] IEEE802.16 WG. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Amendment 2[S]. IEEE802.16 Standard,2005.
- [20] 赵雪梅,李玉,赵泉华. 基于隐马尔可夫高斯随机场模型的模糊聚类高分辨率遥感影像分割算法[J]. 电子学报,2016,44(3):679-686.  
ZHAO Xue-mei, LI Yu, ZHAO Quan-hua. Hidden Markov Gaussian random field based fuzzy clustering algorithm for high-resolution remote sensing image segmentation[J]. Acta Electronica Sinica,2016,44(3):679-686. (in Chinese)
- [21] 章登义,欧阳黜霏,吴文李. 针对时间序列多步预测的聚类隐马尔科夫模型[J]. 电子学报,2014,42(12):2359-2364.

ZHANG Deng-yi, OUYANG Chu-fei, WU Wen-li. Cluster based hidden Markov Modeling time series multi-step prediction[J]. Acta Electronica Sinica,2014,42(12):2359-2364. (in Chinese)

#### 作者简介



**赵海军** 男. 1966年6月出生,四川广安人. 教授、硕士生导师. 1990年和2005年分别在哈尔滨工业大学和西华师范大学获工学学士学位和理学硕士学位. 现为西华师范大学计算机学院通信工程教研室教师,主要从事网络通信、无线通信及信息处理方面的研究工作.

E-mail: zhaohai\_jun@163.com



**崔梦天** 女. 1972年5月出生,内蒙古赤峰人. 教授、工学博士、硕士生导师. 1997年、2005年和2010年分别在内蒙古师范大学、西华师范大学和中国科学院成都计算所获教育学学士学位、教育学硕士学位和工学博士学位. 现为西南民族大学计算机科学与技术学院教师,主要从事算法设计及可靠性方面的研究.