

# M-WiMAX 中马尔可夫预测的 M-LWDF 调度算法研究

胡永东<sup>1,2,3</sup> 吴国新<sup>1,2</sup> 徐逸卿<sup>1,2,3</sup>

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 210096)<sup>1</sup>

(东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室 南京 210096)<sup>2</sup>

(南京林业大学信息科学技术学院 南京 210037)<sup>3</sup>

**摘要** 在 M-WiMAX 系统中为了获得多用户分集增益,更好地发挥自适应调制编码(AMC)的作用,在改进的最大加权时延优先算法(M-LWDF)基础上设计出一个预测的 M-LWDF 跨层分组调度算法(Pre-LWDF)来调度系统中的实时业务。M-LWDF 调度算法在调度判决表达中以调度时刻瞬时速率作为参数,这会影响到调度的稳定性和整体性能,尤其在移动无线通信中更加明显。提出用马尔可夫预测模型来计算下一调度时刻的瞬时速率,平滑当前瞬时速率,减小移动无线信道瞬时速率对调度性能的影响。平滑后的瞬时速率能更好地代表移动信道传输速率的变化趋势。仿真结果表明,该调度算法保证了实时业务流的服务质量,提高了系统的平均吞吐量和公平性。

**关键词** M-WiMAX, 马尔可夫预测模型, 改进最大加权时延优先, 多用户分集增益

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Study on Markov Predictive M-LWDF Scheduling Algorithm in M-WiMAX

HU Yong-dong<sup>1,2,3</sup> WU Guo-xin<sup>1,2</sup> XU Yi-qing<sup>1,2,3</sup>

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)<sup>2</sup>

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)<sup>3</sup>

**Abstract** In the M-WiMAX system, in order to obtain a multi-user diversity gain and better use Adaptive Modulation and Coding (AMC), a predictive scheduling algorithm (Pre-LWDF) was designed with M-LWDF to schedule real-time traffic of WiMAX. M-LWDF algorithm uses instantaneous rate as a judgment parameter at time of the scheduling, therefore, the stability and overall performance of the scheduling algorithm are affected, especially in the mobile wireless communication. Markov prediction model was employed to calculate the instantaneous rate of the next scheduling time, and then smooth out the current instantaneous rate, thus the effect of instantaneous rate on scheduling performance was reduced. The smoothed instantaneous rate can better represent the transmission rate trends of the mobile wireless channel. Simulation results show that the scheduling algorithm insures QoS for rtPS and ertPS traffic and improves the system's average throughput and fairness.

**Keywords** M-WiMAX, Markov prediction model, M-LWDF, Multi-user diversity gain

WiMAX 是一种宽带无线接入(BWA)技术标准,主要用来解决“最后一公里”接入问题。目前 WiMAX 的标准主要以 IEEE802.16d/e<sup>[1,2]</sup> 为主,802.16d 只支持固定接入模式,而 802.16e 则支持移动性功能,称为移动 WiMAX。标准 IEEE802.16m<sup>[3]</sup> 在“快速移动状态”下的传输速率可达 100Mbps,兼容现存的 WiMAX 系统和未来的 4G 标准网络。它是下一代 WiMAX 高级空中接口标准 M-WiMAX。为了满足高速增长的数据业务和多媒体应用对网络带宽和服务质量提出的更高要求,WiMAX 在 MAC 层定义了比较完善的 QoS 机制。但由于 M-WiMAX 的移动信道的传播开放性、接收点地理环境的复杂性和多样性以及通信用户的随机移动性,使得如何有效充分使用无线资源来保证服务质量成为 M-

WiMAX 技术上更大的挑战。

在 WiMAX 系统中,分组调度算法是保证服务质量的一个核心问题,也是一个关键问题,成为当前研究的一个热点。当前有许多分组调度算法被提出,大致可以分为两类:非信道感知调度算法和信道感知调度算法<sup>[4-6]</sup>。非信道感知调度算法在设计时没有考虑无线信道的特点,只是对有线网络的分组调度做一些改进;信道感知调度算法考虑了无线信道的高错误率和突发特性、无线链路的位置相关性和时变性、带宽资源短缺等因素。针对无线信道信号强度的随机衰落,传统上采用各种技术来减小其影响,而多用户分集正是利用用户的独立性,根据信道质量的好坏在不同用户间采用动态时隙分配和自适应的速率匹配来获得系统性能增益。Jalali<sup>[7]</sup> 等人

到稿日期:2013-06-25 返修日期:2013-09-10 本文受江苏省自然科学基金项目(BK2011335)资助。

胡永东(1973-),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线网络、服务质量保证、网络性能分析等,E-mail:huyongdong168@tom.com;吴国新(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络、P2P 网络、网络制造等;徐逸卿(1981-),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线网络等。

提出了应用在 CDMA/HDR 系统中经典的比例公平调度算法(Proportional Fair, PF),随后, Viswanath<sup>[8]</sup> 等人提出了应用在无线网络中的机会调度算法(Opportunistic Scheduling)。这些算法保证了调度公平性,提高了无线系统的服务质量,其核心就是在调度时利用信道的瞬时速率作为衡量信道好坏的指标。但在无线移动通信系统中,信道的瞬时速率很难代表信道的整体性能。

本文在研究 M-WiMAX 系统中分组调度算法时,遵循机会调度的基本思想,用改进最大加权时延优先(Modified-Largest Weighted Delay First, M-LWDF)<sup>[8]</sup> 算法设计出一个跨层调度算法。针对算法中瞬时速率对调度稳定性和整体性能的影响,提出应用马尔可夫预测模型来对下一调度时刻各信道的传输速率进行预测,用下一调度时刻的预测值和当前调度时刻的传输速率的加权平均来衡量信道的好坏。这样,减小了无线移动信道瞬时速率变化对调度性能影响,加权平均平滑后的速率能更好地代表移动信道的传输速率的变化趋势。仿真结果表明,该算法保证了系统服务质量,提高了系统的平均吞吐量和调度公平性。

## 1 相关工作

分组调度是指当多个分组业务流等待接受服务时,必须确定合理的服务规则,安排流的服务顺序和服务时间,以满足各个业务流的 QoS 要求。一个理想的调度算法需要满足几个条件:一是容易实现;二是公平性;三是提供服务质量保证;四是允许比较容易的准入控制决策。随着计算机网络从有线网络到无线网络、从无线网络到无线移动网络的发展,为了适应不同的网络环境,提高 QoS 性能,研究者设计出了许多经典的分组调度算法。在有线网络中,出现了一系列调度算法,典型的有 RR(Round Robin), WRR(Weighted Round Robin), DRR(Deficit Round Robin), GPS(Generalized Processor Sharing), WFQ(Weighted Fair Queuing), WF<sup>2</sup>Q(Worst-case Fair Weighted Fair Queuing), STFQ(Start Time Fair Queuing), SCFQ(Self-Clocked Fair Queuing), VC(Virtual Clock), EDF(Earliest Delay First)等。有线信道相对比较稳定,有线调度算法基本不考虑信道变化因素,但无线信道受到衰落的影响,具有时变特性,研究者根据无线信道的特性,提出了一些经典的无线调度算法,例如 CSDPS(Channel State Dependent Packet Scheduling), WFS(Wireless Fair Service), IWFQ(Idealized Wireless Fair Queuing), SBFA(Service Based Fair Algorithm), CIF-Q(Channel Independent Fair Queuing)等。在无线移动网络也有许多典型调度算法,如 Max C/I(Maximum Carrier to Interference), PF(Proportional Fair), APF(Adaptive Proportional Fair), M-LWDF 等。

M-WiMAX 系统支持 5 种服务:主动授权业务 UGS、实时轮询业务 rtPS、扩展的实时轮询业务 ertPS、非实时轮询业务 nrtPS 和尽力而为服务 BE。每种类型的业务流对服务质量的要求不一样,使得调度算法的研究更加复杂,增加了更多的调度目标因素,成为当前研究的热点。Laias 等人<sup>[10]</sup> 提出一个改进的 DRR 算法以尽力保持算法低时间复杂度。Nagaraju Chirayu 和 Sarkar Manasweta<sup>[11]</sup> 利用 EDF 算法来防止低优先级的业务流出现饥饿现象。文献<sup>[12]</sup> 中介绍了一个多级结构的调度算法,第一级使用严格优先级算法(Strict Prio-

riority, SP),第二级对不同业务流使用不同的调度算法,如 rtPS 业务流使用 EDF 算法, nrtPS 业务流则用 WFQ 算法。文献<sup>[13]</sup> 仍采用分级调度的思想,但其把业务流分为 hard QoS 和 soft QoS 两种类型,分别应用不同的调度算法。甘伟等人<sup>[14]</sup> 设计了一种跨层及动态适应调度编码方案和信道干扰的上行链路调度算法(Dynamic MCS and Interference Aware scheduling algorithm, DMIA)。大量文献表明, WiMAX 中的上行调度算法从单级向多级发展,从单层向跨层方向演进。

## 2 WiMAX 移动信道的传输速率预测

### 2.1 有限状态马尔可夫信道模型

本文研究点到多点(PMP)的 WiMAX 网络,每条连接以移动站 MS 到基站 BS 的上行链路为研究对象,采用瑞利平坦衰落模型对慢变化衰落信道模型进行建模,也就是用有限状态马尔可夫信道模型<sup>[15]</sup> 来描述每个 MS 的时变信道状态。令  $S = s_1, s_2, \dots, s_K$  表示  $K$  个状态的平稳马尔可夫链。 $s_i$  表示时刻  $i$  的状态,  $i = 0, 1, 2, \dots, K$ ,  $P_{ij}$  表示状态转移概率,假设状态转换仅仅发生在相邻状态之间,即  $P_{ij} = 0$ , 如果  $|i - j| > 1$ 。当 BS 收到的 SNR 位于  $[b_i, b_{i+1})$  时,信道状态用  $s_i$  表示,模型中信噪比 SNR 的界限用一个行向量  $B$  表示,  $B = (b_0, b_1, \dots, b_N, b_{N+1})$ , 其中  $b_0 = 0, b_{N+1} = \infty$ 。根据 IEEE 802.16 标准,建立一个 8 状态的马尔可夫信道模型,如图 1 所示,  $b_i$  的值、调制和编码等级以及相应的信道状态见表 1。

表 1 信道状态参数表

状态 ID	调制编码等级	要求的 SNR (dB)	信息量 (bits/OFDM symbol)
0	silent	0	0
1	BPSK(1/2)	3	96
2	QPSK(1/2)	6	192
3	QPSK(3/4)	8.5	288
4	16QAM(1/2)	11.5	384
5	16QAM(3/4)	15	576
6	64QAM(2/3)	18.5	768
7	64QAM(3/4)	21	864

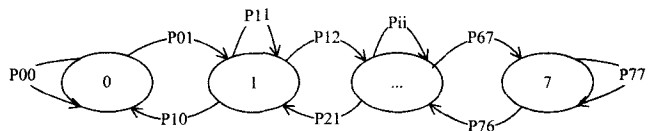


图 1 有限状态马尔可夫信道模型

在有限状态马尔可夫链信道模型中,稳定状态概率  $\pi_i$  为:

$$\pi(i) = \frac{\Gamma(m, m \cdot b_n / \bar{\gamma}) - \Gamma(m, m \cdot b_{n+1} / \bar{\gamma})}{\Gamma(m)} \quad (1)$$

式中,  $\bar{\gamma}$  是平均信噪比,  $m$  是 Nakagami 衰落参数,  $\Gamma(m)$  是 Gamma 函数,  $\Gamma(m, \gamma)$  是互补不完全 Gamma 函数,特别地,当  $m=1$  时,是瑞利衰落信道情况。

状态转移矩阵  $P$  为:

$$P = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{N-2, N-1} & p_{N-1, N-1} & p_{N-1, N} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{N, N-1} & p_{N, N} \end{pmatrix} \quad (2)$$

状态转移概率为:

$$p_{i,i+1} = \frac{L_{i+1} \cdot T_M}{\pi(i)}, i=0,1,\dots,N-1$$

$$p_{i,i-1} = \frac{L_i \cdot T_M}{\pi(i)}, i=0,1,\dots,N$$

$$p_{i,i} = \begin{cases} 1 - p_{i,i+1} - p_{i,i-1}, & 0 < i < N \\ 1 - p_{0,1}, & i = 0 \\ 1 - p_{N,N-1}, & i = N \end{cases}$$

式中,  $T_M$  是 MAC 帧的持续时间,  $L_i$  表示在状态  $i$  的幅度穿越率。

$$L_i = \sqrt{2\pi} \frac{m \cdot b_i}{\gamma} \cdot \frac{f_d}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m \cdot b_i}{\gamma}\right)^{m-1} \cdot \exp\left(\frac{m \cdot b_i}{\gamma}\right)$$

$f_d$  是多普勒频率。

## 2.2 马尔可夫链预测 SS 的传输速率

假设 MS 当前所处的信道状态仅仅取决于前一时刻所处的信道状态,也就是无后效性,符合马尔可夫假设。描述 MS 每个时刻所处信道状态的随机变量序列就构成一个马尔可夫链。该马尔可夫链的初始状态概率向量为  $P(0) = (P_1(0), P_2(0), \dots, P_N(0)) = (0, \dots, 1, \dots, 0)$ , 当 BS 收到的 SNR 位于  $[b_i, b_{i+1})$  时,  $P_i(0) = 1$ 。一步状态转移概率矩阵  $P$  如式(2)所示,根据马尔可夫预测模型:

$$P(k) = P(0)P^{(k)} = P(0)P^k$$

这样就可以预测 MS 在每个时刻所处的信道状态 ID 的值  $j$ :

$$j = \arg \max_{0 \leq j < N} (P_j(1)) = \arg \max_{0 \leq j < N} (P(0) \cdot \vec{P}_j)$$

式中,  $\vec{P}_j$  为转移概率矩阵第  $j$  列的列向量。

根据信道状态  $j$  可以得到每 OFDM 码元所携带的信息量  $m$ , 由奈奎斯特定理可知下一时刻 MS 的传输速率  $u_i$ :

$$u_i = 2W \cdot m$$

式中,  $W$  为 MS 所占用的带宽。

## 3 预测的 LWDF 分组调度算法 Pre-LWDF

### 3.1 Pre-LWDF 分组调度算法思想

根据 IEEE802.16m 标准,在 M-WiMAX 系统中支持 5 种服务。比例公平 PF 调度算法能够增大系统的吞吐量,兼顾公平性,但不能满足 rtPS 和 ertPS 业务的时延要求。改进的最大加权延时优先 M-LWDF 调度算法支持实时业务的时延,但影响实时业务的吞吐量和公平性。与此同时这两种调度算法在调度时都用到了信道的瞬时速率,在无线移动通信中,瞬时速率变化大,无法代表整个信道的好坏,这样就影响了算法的 QoS 性能和稳定性。

这里用马尔可夫预测模型来改进 M-LWDF 算法,平滑 M-LWDF 算法中的瞬时速率,增强调度算法的稳定性和系统的整体性能。预测的 M-LWDF 算法用于调度实时性强的 rtPS 和 ertPS 业务队列,在保证实时业务 QoS 的同时,提高系统的平均吞吐量和业务间调度的公平性。

### 3.2 Pre-LWDF 分组调度算法

在 CDMA 系统中,为了保证分组的 QoS 时延要求, Bell 实验室提出了最大加权延时优先 LWDF (Largest Weighted Delay First) 算法和改进的最大加权延时优先 M-LWDF 算法。LWDF 算法的大致思想为:假设有  $N$  个用户,每个用户  $i$  有它们自己的概率 QoS 要求:

$$\Pr\{W_i > T_i\} \leq \delta_i \quad (3)$$

式中,  $W_i$  是用户  $i$  稳定状态下的分组时延,参数  $T_i$  是用户分

组的时延门限,  $\delta_i$  是  $W_i$  超过  $T_i$  的概率。假设每个用户  $i$  的权值  $c_i(t)$  表示每单元数据率的传输功率的要求, BS 的传输功率是有限的并标准化为 1, 用户  $i$  传输数据率为  $u_i(t)$ , 则每个用户  $i$  必须同时满足

$$\sum_{i=1}^N c_i(t) u_i(t) \leq 1 \quad (4)$$

根据式(3)、式(4)的两个约束条件得到 LWDF 算法的调度规则:

$$a_j W_j(t) = \max_i a_i W_i(t)$$

式中,  $W_i(t)$  是用户  $i$  的分组在时间  $t$  的最大时延,  $a_i > 0, i = 1, \dots, N$ , 是一个固定的常数集。如果  $a_i = -\log(\delta_i)/T_i$ , 则使 LWDF 成为一个准优化策略。

该算法用概率表达式定义用户对时延的要求,使算法设计更加灵活与通用,满足了分组的时延约束,保证了服务的公平性。但算法并没有考虑不同信道条件的影响,无法发挥多用户分集的作用,不能优化调度器的吞吐量。于是 Bell 实验室又提出了其改进算法 M-LWDF, 它引入一个表征信道条件的参数  $c_i(t)$ , M-LWDF 算法的调度规则如下:

$$\frac{\gamma_i W_i(t)}{c_i(t)} = \max_i \frac{\gamma_i W_i(t)}{c_i(t)}$$

式中,  $\gamma_i > 0, i = 1, \dots, N$ , 是一个任意固定常数。在无线通信时,若信道状态好,则需要的传输功率小,传输的速率在同等条件下更快。所以上式可以改写为

$$\gamma_i u_i(t) W_j(t) = \max_i \gamma_i u_i(t) W_i(t)$$

从 M-LWDF 算法的调度规则中可以看到,瞬时速率影响调度结果。但瞬时速率的大小不能完全表征信道条件的好坏,从而影响算法的性能,尤其在 M-WiMAX 系统中, AMC 算法的应用会使这个问题更为突出。为了使引入的参数更好地表征无线信道的好坏情况,在此提出用马尔可夫预测模型来预测下一个调度时刻信道的传输速率,然后使用速率的加权平均对调度规则进行改进,形成一个预测的 M-LWDF 算法(Pre-LWDF),调度规则为:

$$j = \arg \max_i \gamma_i (a u_i(t) + (1-\alpha) u_i(t+1)) W_i(t)$$

式中,  $\alpha$  为加权因子,  $0 \leq \alpha \leq 1, u_i(t+1)$  为用户  $i$  在下一调度时刻的传输速率预测值,具体的计算方法见第 2.2 节。当  $\alpha = 1$  时, Pre-LWDF 算法就退化为 M-LWDF 算法。

## 4 算法性能分析

### 4.1 性能分析指标

平均吞吐量:在一个调度时间间隔内用户传输数据的总数。用滑动指数平均表示如下:

$$\hat{\tau}_t = \alpha * \tau_t + (1-\alpha) * \hat{\tau}_{t-1}$$

式中,  $\hat{\tau}_t, \hat{\tau}_{t-1}$  分别是调度时间  $t$  和调度时间  $t-1$  内的平均吞吐量,  $\tau_t$  是时间  $t$  内总的吞吐量,  $\alpha$  是常数。

平均时延:所有分组离开队列的时间分组与它们到达时间之差的平均值。用公式表示如下:

$$\hat{d} = \sum_{i=1}^N (L_i - A_i) / N$$

式中,  $\hat{d}$  为平均时延,  $L_i, A_i$  分别为分组的离开时间和到达时间,  $N$  为总的分组数目。

公平性:公平性分为两种,一种是相同业务流用户之间的公平度量,称为类内公平性;另一种是所有业务流用户之间的

度量,称为类间公平性。这里用 Jain's 公平指标计算类间公平,用最大最小公平指标来计算类内公平性。因为最大最小公平对服务的降级和服务的不公平性比较敏感。两种公平指标具体定义如下:

$$F_{Jain's} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / \left( n * \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)$$

式中,  $x_i$  为用户  $i$  的标准化的平均吞吐量,  $n$  为用户数目。

$$F_{Max-Min} = x_{min} / x_{max}$$

式中,  $x_{min}$ 、 $x_{max}$  分别为同一类型业务流最小、最大平均吞吐量。

## 4.2 仿真结果及分析

### 4.2.1 仿真环境及参数设置

在 NS2 中设计一个  $1100m * 1100m$  的 WiMAX 仿真环境,其中有一个基站 BS、一个 Sink 节点和若干个移动站 MS。节点 BS 与节点 Sink 之间通过有线链路连接,节点 MS1、节点 MS2 和节点 MSn 直接通过无线链路连接。节点 MS1、节点 MS2 和节点 Sink 之间建立 UDP 连接和 VBR 数据流,拓扑结构如图 2 所示。在此网络中,无线节点的主要参数设置如下:无线传输模型是 TwoRayGround,网络接口类型是无线物理层,MAC 层协议采用 802.16 协议,接口队列类型是 IFQ 队列,逻辑链路层类型为 LL 层,天线模型是全向天线,网络接口队列的大小是 50,无线路由协议是 DSDV 协议,详见表 2。

表 2 无线仿真环境参数表

Type	Value
channel type	Channel/WirelessChannel
radio-propagation model	Propagation/TwoRayGround
network interface type	Phy/WirelessPhy
MAC type	Mac/802_16
interface queue type	Queue/DropTail/PriQueue
link layer type	LL
antenna model	Antenna/OmniAntenna
max packet in IFQ	50
number of mobilenodes	31
routing protocol	DSDV
X dimension of topography	1100
Y dimension of topography	1100
time of simulation end	100

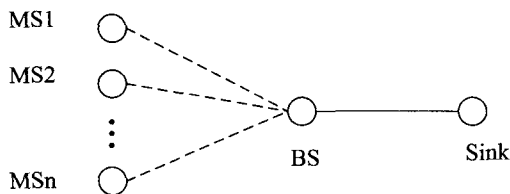


图 2 仿真网络拓扑图

每个移动站 MS 调度器的服务流类型设置为 rtPS,接收 SNR 根据需要设置为相应值,基站 BS 的调度算法依次设置为 RR, mSNR, M-LWDF, Pre-LWDF。然后,对这些调度算法进行性能分析实验。

### 4.2.2 仿真结果分析

仿真实验时,实验场景分为:系统负载设置为轻或重,移动节点的移动速率为慢速移动或快速移动。得到相应的仿真数据,对数据进行网络平均吞吐量和调度算法公平性分析,分析结果如图 3—图 6 所示。图中的移动节点数分别为 3、6、9。图 3、图 5 为慢速移动下的系统平均吞吐量和调度算法公平性,图 4、图 6 为快速移动下的系统平均吞吐量和调度算法公平性。

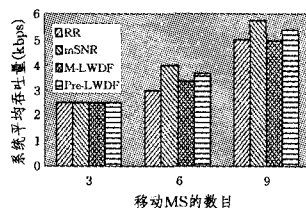


图 3 移动节点慢速移动下系统平均吞吐量

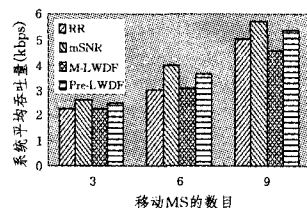


图 4 移动节点快速移动下系统平均吞吐量

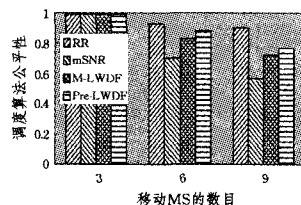


图 5 移动节点慢速移动下的调度算法公平性

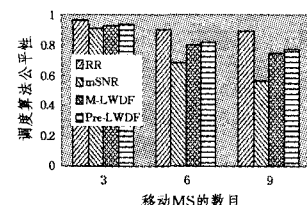


图 6 移动节点快速移动下的调度算法公平性

#### 1) 网络吞吐量分析

从图 3 和图 4 可以分析出,系统负载较轻时,不管移动节点的速度快和慢,各种调度算法的平均吞吐量基本相同,随着系统负载的加重, mSNR 调度算法在系统平均吞吐量上优于其他调度算法。Pre-LWDF 调度算法在系统平均吞吐量上优于 M-LWDF 调度算法,随着移动节点的移动速度的增大,这种优势更加明显。Pre-LWDF 在保证服务质量的同时,系统平均吞吐量比 RR 和 M-LWDF 算法高,仅次于 mSNR 算法。

#### 2) 调度算法公平性分析

从图 5 和图 6 可以分析出,系统负载较轻时,不管移动节点的速度快和慢,各种调度算法的公平性基本相同,随着系统负载的加重,RR 调度算法在调度公平性上优于其他调度算法,但整体公平性都有所下降。尤其是 mSNR 算法,虽然系统平均吞吐量最大,但调度公平性下降比较明显。Pre-LWDF 调度算法在调度公平性上优于 M-LWDF 调度算法,随着移动节点的移动速度的增大,这种优势不会减弱。在保证服务质量的同时,Pre-LWDF 算法的调度公平性仅次于 RR 算法,优于其他 3 种调度算法。

**结束语** 在高速移动的 M-WiMAX 环境中,为了提高系统的吞吐量,兼顾各个用户的公平性,充分发挥多用户分集增益,结合机会调度的基本思想,提出了利用马尔可夫预测模型来改进 M-LWDF 算法,使得该调度算法能更好地适应无线移动网络环境,在获得较好的吞吐量和公平性的同时,又能保证调度算法的服务质量和稳定性。仿真结果表明,跨层调度算法在无线网络中,随着网络负载的增大,能提高系统的平均吞吐量;改进的 Pre-LWDF 算法能更好地适应无线移动网络环境,尤其针对 M-WiMAX 系统的 rtPS 和 ertPS 业务流,在满足它们的服务质量的同时,能提高系统的吞吐量,调度算法的公平性也不会降低。当前是在 PMP 网络移动环境中用仿真方法分析评估该算法的性能,下一步将对算法在 Mesh 环境中的性能做出分析评估,同时对算法性能进行理论分析和探讨。

## 参考文献

[1] IEEE 802.16 WG. IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: air interface for fixed broadband wireless ac-

cess systems[S]. New York;IEEE,2004

- [2] IEEE 802.16 WG. IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems, amendment 2; Physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands and corrigendum[S]. New York;IEEE,2006
- [3] IEEE 802.16 WG. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16; Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, Amendment 3; Advanced Air Interface[S]. New York;IEEE,2011
- [4] Chakchai S, Jain R, Tamimi A K. Scheduling in IEEE 802.16e mobile WiMAX networks; key issues and a survey [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(2):156-171
- [5] Msadaa I C, Camara D, Filali F. Scheduling and CAC in IEEE 802.16 fixed BWNs; a comprehensive survey and taxonomy[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2010, 12(4):459-487
- [6] Chaari L, Saddoud A, Maaloul R, et al. A comprehensive survey on WiMAX scheduling approaches[M]//Quality of Service and Resource Allocation in WiMAX. Europe; InTech, 2012:25-58
- [7] Jalali A, Padovani R, Pankaj R. Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency high data rate personal communication wireless system[C]//Vehicular Technology Conference Proceedings. Tokyo, Japan, 2000:1854-1858
- [8] Viswanath P, Tse D, Laroia R. Opportunistic beamforming using

dumb antennas[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6):1277-1294

- [9] Andrews M, Kumaran K, Ramanan K, et al. CDMA data QoS scheduling on the forward link with variable channel conditions [R]. Bell Labs Technical Report, 2000
- [10] Laias E, Awan I, Chan P M. An integrated uplink scheduler in IEEE 802.16[C]//the second UKSIM European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Liverpool, England, 2008; 518-523
- [11] Nagaraju C, Sarkar M. A packet scheduling to enhance quality of service in IEEE 802.16[C]//the World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco, USA, 2009;1-6
- [12] Kitti W, Aura G. Packet scheduling for QoS support in IEEE 802.16 broadband wireless access systems [J]. International Journal on Communications, 2003, 16(1):81-96
- [13] Shang Y L, Cheng S D. An enhanced packet scheduling algorithm for QoS support in IEEE 802.16 wireless network[C]//the Third International Conference on Networking and Mobile Computing. Zhangjiajie, China, 2005;652-661
- [14] Gan W, Xiao J Q, Xie X Z, et al. A cross-layer designed scheduling algorithm for WiMAX uplink[C]//The Ninth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Beijing, China, 2009
- [15] Zhang Q Q, Kassam S A. Finite-state Markov model for Rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(11):1688-1692

(上接第30页)

私节点被惩罚的风险降低,导致更多的正常节点选择不合作,使得部分正常节点向自私节点转变,最终达到纳什均衡状态。初始合作节点的比重越高,转变为自私节点的数量也越大,则有更多的正常节点利益受损,系统的平均收益降低。

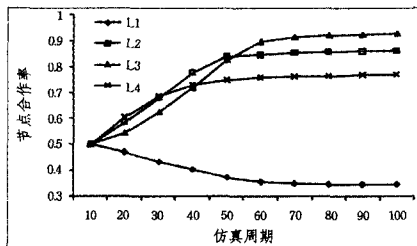


图3 不同惩罚因子 $r$ 环境下节点合作率随仿真周期变化的折线图

**结束语** 本文借鉴社会规范中联合抵制的思想,建立一套社会规范准则来规范网络中节点的交易行为,每个节点都必须严格遵守该社会规范准则,否则将受到相应的惩罚。在社会规范准则模型的基础上,提出了节点趋向选择的一些定理和条件,并通过博弈论的相关知识证明了定理的正确性。通过仿真实验验证和分析了规范准则模型中一些参数对该社会规范激励机制的影响,结果表明当模型参数满足条件时,社会规范准则模型能够有效地激励节点选择合作和惩罚自私节点,从而抑制搭便车行为。但文中的仿真环境较理想,未来将研究如何将模型应用于实际的网络环境中。

## 参考文献

- [1] Teacy W T L, Patel J, Jennings N R, et al. Travos: Trust and reputation in the context of inaccurate information sources[J].

Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2006, 12(2): 183-198

- [2] Khambatti M, Dasgupta P, Ryu K D. A role-based trust model for peer-to-peer communities and dynamic coalitions[C]//The 2nd IEEE Int'l Information Assurance Workshop. Charlotte; IEEE Computer Society, 2004:141-154
- [3] 余一娇,金海. 对等网络中的搭便车行为分析与制综述[J]. 计算机学报, 2008, 31(1):1-15
- [4] Levin D. BitTorrent is an Auction; Analyzing and Improving BitTorrent's Incentives[C]//Proceedings of Sigcomm. 2008
- [5] 孟宪福,王动. 基于重复博弈和惩戒机制的P2P协作激励信誉模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010(5):886-892
- [6] 欧阳竞成,林亚平,周四望,等. 基于博弈论的P2P系统激励机制[J]. 计算机工程, 2009, 35:207-209
- [7] 王浩云,徐焕良,任守纲,等. 基于第二价拍卖理论的P2P网络组播节点激励机制研究[J]. 计算机科学, 2012, 39:41-45
- [8] Zhang Yu, Park J, van der Schaar M. Peer-to-Peer Protocol Designs based on Social Norms[R]. UCLA Technical Report, 2009
- [9] Zhang Yu, van der Schaar M. Peer-to-Peer Multimedia Sharing based on Social Norms[C]//Signal Processing; Image Communication. 2012
- [10] Zhang Yu, van der Schaar M. Reputation-based Incentive Protocols in Crowdsourcing Applications[C]//INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE. 2012:2140-2148
- [11] Zhang Y, Park J, van der Schaar M. Designing Social Norm Based Incentive Schemes to Sustain Cooperation in a Large Community[C]//Proc. 2nd International ICST Conf. on Game Theory for Networks, 2011
- [12] 张维迎. 博弈与社会[M]. 北京:北京大学出版社, 2013:149-151