

一种用于无线网络中实时业务的跨层调度算法*

郝丹丹⁺, 邹仕洪, 程时端

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

A Cross-Layer Scheduling Algorithm for Real-Time Applications in Wireless Networks

HAO Dan-Dan⁺, ZOU Shi-Hong, CHENG Shi-Duan

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62246649 ext 201, Fax: +86-10-622487638, E-mail: d.hao@126.com

Hao DD, Zou SH, Cheng SD. A cross-layer scheduling algorithm for real-time applications in wireless networks. *Journal of Software*, 2008,19(1):156–166. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/156.htm>

Abstract: This paper proposes a scheduling algorithm, RTCLA (real-time cross-layer scheduling algorithm for real-time application), at MAC layer for real-time applications traversing heterogeneous networks including wired and wireless links. RTCLA is a cross-layer algorithm, combined with adaptive modulation and coding (AMC) and selective repeat-automatic repeat request (SR-ARQ). It is designed to improve spectrum utilization when satisfying packet error rate (PER) and delay requirements. Simulations are employed to evaluate the performance of RTCLA in three metrics including system packets time-out rate, average system effective throughput and fairness and it is compared with the modified proportional fair (MPF), the earliest deadline first (EDF) and the modified largest weighted delay first (M-LWDF) algorithms. Simulation results show that RTCLA outperforms MPF, EDF and M-LWDF algorithms in terms of the strict delay requirements of real-time applications, scarcity of spectrum and the time-varying channels, especially in the performance of packet time-out rate. Furthermore, the simulation results show that RTCLA performs the same as other three algorithms in stability.

Key words: cross-layer; scheduling algorithm; wireless networks; performance; real-time application

摘要: 就同时包含了有线链路和无线链路的异构网络上的实时应用,提出了一种满足其端到端服务质量(QoS)需求的无线网络 MAC(media access control)层调度算法(real-time cross-layer scheduling algorithm for real-time application,简称 RTCLA)。该算法采用跨层的思想,结合了自适应调制编码(adaptive modulation and coding,简称 AMC)技术和选择性自动请求重传(selective repeat-automatic repeat request,简称 SR-ARQ)技术,在满足应用的系统误包率(packet error rate,简称 PER)要求、尽可能减少基站中等待超时分组数目的前提下,提高系统吞吐性能和频谱利用率。通过仿真来验证算法分组超时率、平均系统有效吞吐率和公平性 3 个方面的性能,并与改进的比例公平算法(modified proportional fair,简称 MPF)、最早到期优先(earliest deadline first,简称 EDF)和改进的最大加权延时优先(modified largest weighted delay first,简称 M-LWDF)等 3 种广泛使用的算法进行了比较。仿真结果还表明,综合考虑实时应用的严格时延要求和无线网络资源稀缺以及信道的时变特性,RTCLA 更适合于对时延敏感的实时应用,尤

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60603060, 60502037, 90604019 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2003CB314806 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2006-09-26; Accepted 2007-01-23

其在分组超时率性能方面表现突出,此外,仿真结果还表明,RTCLA 在稳定性方面的表现与其他 3 种算法基本相同。

关键词: 跨层;调度算法;无线网络;性能;实时应用

中图分类号: TP393

文献标识码: A

在以异构性和泛在移动性为特征的下一代网络中,网络可以支持越来越多的各类应用.对于异构网络中那些对时延敏感的实时应用来说,无线链路由于其无线资源稀缺、带宽的限制和无线信道的时变特性等特点,其上传输出错率和分组传输延时都远远高于有线网络,是影响实时应用性能的主要瓶颈之一.为了提供有 QoS 保证的高效传输服务,很多研究采用以链路自适应为核心的跨层技术和调度技术相结合,提高无线链路的传输性能和频谱利用率,如文献[1-11],现有的多用户跨层自适应调度算法并不能确保满足实时应用端到端的时延要求.多用户跨层自适应调度机制涉及自适应调制编码(adaptive modulation and coding,简称 AMC)、自动请求重传机制/混合型自动请求重传(ARQ/HARQ)、调度算法和跨层设计 4 方面.AMC、RQ 与跨层技术相结合,考虑 MAC(media access control)层 ARQ(automatic repeat request)对性能带来的影响,根据数据链路层和 TCP 层上的 QoS 需求以及物理层信道状况选取合适的调制编码方案,以期优化频谱利用率或吞吐性能,如文献[1-5]等.在已有的单跳时分共享信道多用户系统中经典的 MAC 层调度算法轮询法、基于 SNR 的调度算法、PEDF/HOLPRO、LWDF/M-LWDF、PF/MPF 算法^[12,13]等中,PEDF(powered earliest deadline first)和 HOLPRO(head of line pseudoprobability)算法未考虑用户的信道条件,频谱利用率低;考虑了时延因素的 LWDF/M-LWDF(largest weighted delay first/modified largest weighted delay first)算法^[14]对系统的延时性能有一定改善,但不能提供有端到端时延保证的传输服务;其他算法以公平性或吞吐效率为前提进行调度,都可能出现数据链路层等待时间过长的现象.而近年来结合跨层自适应技术的调度算法,如 AMC 与 ARQ/HARQ 相结合的改进的比例公平(modified proportional fair,简称 MPF)调度算法^[5]、Klein 的 TCP 比例公平算法^[10]、Liu 的 AMC 与 ARQ 相结合的跨层调度算法^[15]、Ma 的多用户公平调度策略^[16]等,以提高频谱利用率、系统吞吐率和一定的公平性为主要目标,并不能提供满足端到端时延要求的传输服务.因此,对无线网络段上越来越多的对时延敏感的实时业务来说,提供端到端 QoS 保证的、基于跨层设计的 MAC 层调度算法仍是值得研究的领域.

文章第 1 节给出系统描述.第 2 节为系统建模.系统参数描述和详细的算法步骤在第 3 节给出.第 4 节为算法分析中用到的性能指标.第 5 节给出仿真结果.最后,第 6 节为结论.

1 系统描述

1.1 系统描述

本文着重研究异构网络中无线链路段上的调度算法,其设计主要是为了保证异构网络中对时延敏感的实时业务的端到端性能.整个网络由有线链路段和无线链路段组成(如图 1 所示).无线链路段中假设一个小区包括一个基站(base station,简称 BS)和 U 个用户,基站和用户终端(user equipments,简称 UEs)均具有一副单向收发天线,小区中的活动用户共享信道,本文假设信道为平坦慢衰信道;无线链路段使用自适应调制和选择性自动请求重传(selective repeat-automatic repeat request,简称 SR-ARQ)机制;采用时分工作方式,同一时隙只有一个用户占用共享信道接收数据.在本文的分析和仿真实验中,虽然以下行链路为例,但是所有的分析均适用于上行链路.

图 2 为无线链路段配置的简化示意图.系统中,物理层支持多种调制方式,即 M -QAM($M=2,4,8,32,64,\dots$),采用自适应调制编码技术来决定所使用的调制方式.接收方根据数据链路层误包率(packet error rate,简称 PER)要求和当前接收帧的信道状况来确定下一帧的调制方式,并将此信息反馈给发送方.基站端为小区中每个用户的分组数据单独进行排队,并在每个调度时隙上根据一定的调度算法对各用户分组进行调度,为用户分配信道,传输分组数据,并通知物理层所选用的调制模式;而各个活动的 UE 端,则根据当前信道状况由调制模式选择单元决定下一接收帧的调制模式,并通过反馈信道通知基站.

为确保满足用户的 PER 需求,本文在信噪比区间门限值的选取上使用了信道状况的二阶统计特性^[4].由于考虑的是平坦慢速衰落信道,所以只使用信噪比(SNR)参数来描述信道状态,根据信噪比的不同值,把信道划分

为多个状态,每个状态对应一种调制方式,并满足公式(1)所描述的 PER 约束条件:

$$\overline{\varepsilon}_i^{uj}(M_i) \leq \varepsilon_0^{uj}, i \in [1, \dots, N], u, j = 1, \dots, U \tag{1}$$

其中, $\overline{\varepsilon}_i^{uj}(M_i)$ 是用户 uj 的信道处于第 $i+1$ 个状态时,使用调制方式 (2^i-QAM) 对应的平均误包率; ε_0^{uj} 是该用户的 PER 需求.各个用户因为本身信道状况以及 PER 的需求不同,其信道状态的划分也可能不同.

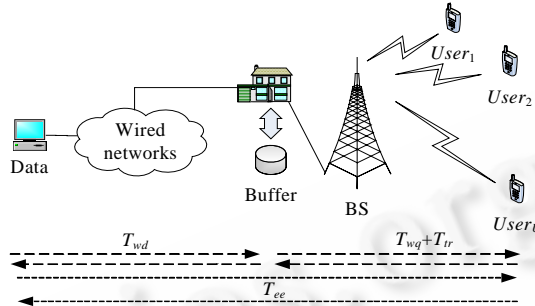


Fig.1 Illumination of the heterogeneous networks

图 1 异构网络示意图

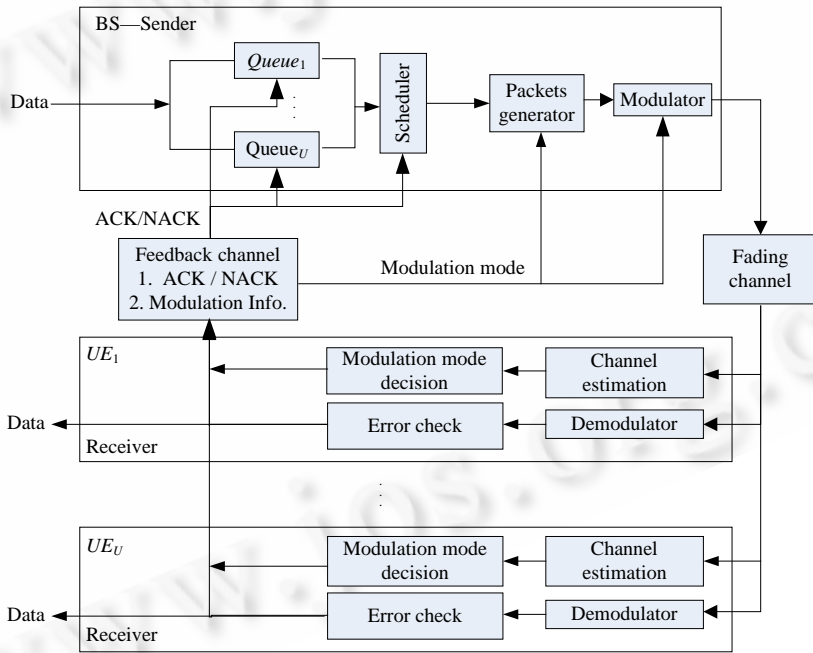


Fig.2 Simplified system configuration

图 2 系统配置简化图

1.2 假设

本节给出随后分析中用到的假设条件.在无线网络部分中,物理层上系统以帧作为数据传输单位,每帧中包含固定数目的符号(symbol),即帧长 T_f 固定;数据链路层上分组长度固定为 $N_L, N_L = N_h + N_p$,其中, N_h 为分组头部长度, N_p 为分组载荷长度,并采用 SR-ARQ 技术来减少传输错误.本文假设 UE 端一检测到错误,就马上通过反馈信道通知基站,并启动重传,重传分组采用与首次传输时相同的调制方式.UE 端根据当前信道质量以及其误包率要求来选择下一接收帧的调制方式,并通过反馈信道告知基站.假设小区中每个用户的信道都是加性白高斯噪声信道(additive white Gaussian noise,简称 AWGN),信道平坦慢衰落,因此,假设信道状态在一个帧内保持不

变,一帧内所有符号采用相同的调制方式.假设接收方(UEs 端)能够准确检测到当前信道状况,据此决定下一接收帧的调制方式,并将此信息通过反馈信道无差错、无丢失地反馈给基站.本文在分析和仿真实验中并没有使用前向纠错编码(forward error correction,简称 FEC).但是,若像 IEEE 802.11a^[17],IEEE 802.16e^[18]等现有标准那样,在自适应调制时使用前向纠错编码的话,相同的目标误包率约束条件下可能会得到不同的信噪比区间门限值,但分析的过程是完全一样的.假设系统数据链路层能够准确地检测到分组传输错误,若接收到的分组出错,接收方(UEs 端)立即通过反馈信道通知基站重传出错分组,并假设 ACK/NACK 反馈信息传送无差错无丢失.为了避免分组数据链路层上重传次数过多引起的延时使传输层误认为网络拥塞而开始进行拥塞控制,在数据链路层给出最大重传次数约束条件.假设基站端各用户队列长度无限,在时刻 t 到达的分组数目为参数 λ 的泊松分布.假设数据从 TCP 层到数据链路层无延时,且有线链路段的分组传输错误和超时与无线链路段相比可忽略^[19].

2 系统模型

为了便于对 RTCLA 算法性能与已有算法的性能进行对比分析,验证 RTCLA 算法适用于有严格端到端 QoS 要求的对时延敏感的实时应用,本文首先对系统进行建模,以便在后续的小节中基于所建系统模型对算法进行仿真,并在相同模型系统的基础上对比算法性能.

2.1 信道模型

使用瑞利衰落信道为系统中各用户信道建模,假设通过功率控制使接收到的平均信噪比保持为一个常数,信号包络服从瑞利分布,接收的信噪比服从指数分布,用户 uj 信道的即时信道比 $\gamma_{uj}(uj=1, \dots, U)$ 服从指数分布,其概率密度函数为 $f_{\gamma_{uj}}(\gamma_{uj}) = (1/\overline{\gamma_{uj}})\exp(-\gamma_{uj}/\overline{\gamma_{uj}})$, $\overline{\gamma_{uj}} \geq 0$, 其中, $\overline{\gamma_{uj}} = E\{\gamma_{uj}\}$ 是用户 uj 信道的平均信噪比.

各用户的信道均根据 BS 所支持的调制方式的数目 N 将各用户信道的 SNR 取值区间被划分为 $N+1$ 个连续、不重叠的区间段 $\{\Gamma_i^{uj}\}_{i=0}^{N+1}$, 每个信噪比区间段对应一个信道状态,共 $N+1$ 个状态^[4], 状态空间 $S_{uj} = \{State_0^{uj}, State_1^{uj}, \dots, State_N^{uj}\}$. 如果用户 uj 在时刻 t 检测到的 SNR 在区间 $[\Gamma_i^{uj}, \Gamma_{i+1}^{uj}]$ 内, 则该用户终端判定其信道状态处于状态 $State_i^{uj}$. 因信道是平坦慢衰信道, 所以, 为每个用户信道建模为一个离散状态的马尔可夫链(如图 3 所示).

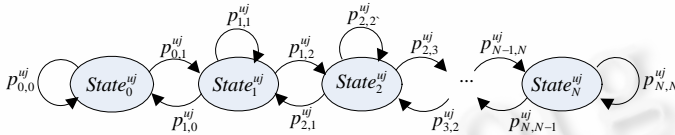


Fig.3 Discrete Markov process for the channel of user uj

图 3 用户 uj 信道的离散状态的马尔可夫链模型

当用户 uj 信道处于状态 $State_0^{uj}$ 时,也就是说,其信道的即时 SNR 处于区间 $[0, \Gamma_1^{uj}]$ 时, UE 端告知基站信道状态差, 为避免深度衰落, BS 并不为该用户分配信道进行数据传输. 在时刻 t , 当用户 uj 信道处于状态 $State_i^{uj}$ 即 $State_i^{uj} = \{i | \Gamma_i^{uj} \leq S_{uj}(t) < \Gamma_{i+1}^{uj}\}$, $i \in \{0, \dots, N\}$, $uj=1, \dots, U$ 时 ($S_{uj}(t)$ 是用户 uj 信道的即时 SNR), 通知 BS 发送数据时采用 M_i -QAM ($M_i=2^i, i=1, \dots, N$) 调制方式. 因而, 可以得到用户 uj 信道状态的稳态概率:

$$\pi_i^{uj} = \int_{\Gamma_i^{uj}}^{\Gamma_{i+1}^{uj}} f_{\gamma_{uj}}(\gamma_{uj}) d\gamma_{uj} = \int_{\Gamma_i^{uj}}^{\Gamma_{i+1}^{uj}} (1/\overline{\gamma_{uj}})\exp(-\gamma_{uj}/\overline{\gamma_{uj}}) d\gamma_{uj}, \overline{\gamma_{uj}} \geq 0, i=1, \dots, N+1, uj=1, \dots, U \quad (2)$$

因为信道是慢速衰落信道, 故可以假设状态转移只发生在相邻状态之间, 从而可以得到如图 3 所示信道状态的转移的稳态概率^[1]:

$$\begin{cases} p_{i,i+1}^{uj} \approx N(\Gamma_{i+1}^{uj})T_f / \pi_i^{uj}, & i=0, \dots, N-1 \\ p_{i,i-1}^{uj} \approx N(\Gamma_i^{uj})T_f / \pi_i^{uj}, & i=1, \dots, N \\ p_{i,j}^{uj} \approx 0, & |i-j| \geq 2 \\ p_{i,i}^{uj} \approx 1 - \sum_{i=1, j \neq i}^N p_{i,j}^{uj}, & i=0, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

其中, $N(\Gamma_i^{uj})$ 为各信噪比区间门限值 Γ_i^{uj} 上接收信号的电平通过率. 设 f_m^{uj} 为最大多普勒频移, 可以根据文献 [20] 中的公式求出 $N(\Gamma_i^{uj})$, 即 $N(\Gamma_i^{uj}) = \sqrt{2\pi\Gamma_i^{uj} / \gamma_{uj}} f_m^{uj} \exp(-\Gamma_i^{uj} / \gamma_{uj})$, $\gamma_{uj} \geq 0$.

2.2 信道状态划分

由于用户要求系统所提供的传输服务满足第 1.1 节中公式(1)所示的 PER 性能需求, 所以, 为了确保提供满足用户 PER 性能需求的传输服务, 本文沿用文献[4]中的方法来进行计算各用户的信噪比区间的门限值:

对于每个用户 $uj=1, \dots, U$:

第 1 步. 令 $\Gamma_0^{uj} = 0$, $\Gamma_{N+1}^{uj} = +\infty$, $i=N$.

第 2 步. 对于每个用户 uj , 寻找满足 $\Gamma_i^{uj} = 1 \{ \varepsilon_i^{uj}(M_i) = \varepsilon_0^{uj}, i \in [1, \dots, N], uj=1, \dots, U \}$ 的最小的 Γ_i^{uj} ($\Gamma_i^{uj} \in [0, \Gamma_{i+1}^{uj}]$), 其中, $1\{\cdot\}$ 为示性函数.

第 3 步. 如果 $i>0$, 则 $i=i-1$, 然后转到第 2 步. 如果 $i=0$, 则用户的信噪比区间门限值的计算结束.

而用户 uj 在信道状态 $State_i^{uj}$ ($i \neq 0$) 时, 即采用调制方式 M_i ($i \neq 0$) 时, 即时 PER 和平均 PER 分别为

$$\varepsilon_{uj}(M_i, \gamma_{uj}) = 1 - (1 - \varphi_{uj}(M_i, \gamma_{uj}, \rho_{uj}))^{N_i} \tag{4}$$

$$\overline{\varepsilon}_{uj}(M_i) = \frac{1}{\pi_{ij}} \int_{\Gamma_i^{uj}}^{\Gamma_{i+1}^{uj}} \varepsilon_{uj}(M_i, \gamma_{uj}) f_{\gamma_{uj}}(\gamma_{uj}) d\gamma_{uj} \tag{5}$$

其中, $\varphi_{uj}(M_i, \gamma_{uj}, \rho_{uj})$ 为用户 uj 在调制方式为 M_i 时的误比特率 (bit error rate, 简称 BER). 为了便于计算, 本文采用文献[16]中近似计算公式来计算该参数:

$$\varphi_{uj}(M_i, \gamma_{uj}, \rho_{uj}) \approx a(M_i, \rho_{uj}) \exp(-b(M_i, \rho_{uj}) \gamma_{uj}) \tag{6}$$

$a(M_i, \rho_{uj}) = 0.4(M_i - 1) / (3\overline{\gamma}_{uj}(1 - \rho_{uj}) + 2(M_i - 1))$, $b(M_i, \rho_{uj}) = 3\rho_{uj} / (3\overline{\gamma}_{uj}(1 - \rho_{uj}) + 2(M_i - 1))$, $\rho = J_0^2(2\pi f_m T_f)$, $J_0(\cdot)$ 为第 1 类零阶贝塞尔函数.

2.3 用户 QoS 需求

除式(1)所描述的用户 PER 性能需求外, 对于时延敏感的实时应用来说, 另一个重要的性能指标是端到端的时延约束. 设 ψ_{uj} 为用户 uj 最大可容忍的端到端时延, T_{ee}^{uj} 为用户 uj 数据的端到端时延, 则该用户的时延性能需求可以描述为

$$\psi_{uj} \geq T_{ee}^{uj} \tag{7}$$

3 算法

3.1 参数说明

设 A_t 为 t 时刻基站端分组到达数, 假设 A_t 服从参数为 λ 的泊松分布 $P(A_t = n) = \lambda^n \exp(-\lambda) / n!$, $n \geq 0$, 其中, $\lambda = E\{A_t\}$, 是 A_t 的数学期望. $Q_{uj}(uj=1, \dots, U)$ 为 BS 端数据链路层上用户 uj 的缓存队列, 队列中的分组遵守先进先出 (first in first out, 简称 FIFO) 规则进行数据传输; $\xi_{uj}(t)$ 表示队列 Q_{uj} 的队头分组在时刻 t 时的等待时长; $L(Q_{uj}, t)$ 表示队列 Q_{uj} 在时刻 t 时的队列长度. 为简单起见, 假设一个 IP 分组只封装一个 TCP 分段, 而一个数据链路层分组也只封装一个 IP 分组. 因为已经假设数据从 TCP 层到数据链路层无时延, 且有线链路段分组超时或传输错误可以忽略, 因此, 可以通过计算数据链路层上分组超时率获得端到端的 TCP 分段超时率. 设 T_{wd}^{uj} 为用户 uj 有线链路段的传输时延, T_{wq}^{uj} 为分组在队列中的等待时延, T_{tr}^{uj} 为分组在无线链路段的传输时延 (包括分组的重传时延以及相应的反馈信息时延), 则用户 uj 的端到端时延为

$$T_{ee}^{uj} = T_{wd}^{uj} + T_{wq}^{uj} + T_{tr}^{uj} \tag{8}$$

因此, 式(7)描述的时延约束条件也可以写为

$$\psi_{uj} \geq T_{wd}^{uj} + T_{wq}^{uj} + T_{tr}^{uj} \tag{9}$$

3.2 算法描述

本文提出的算法所涉及的跨层思想主要包含两个方面:一方面,UEs 根据物理信道状态、MAC 层上重传信息以及数据链路层上 PER 约束来选择下一接收帧的调制方式,这涉及到了 MAC 层/数据链路层和物理层之间的交互;另一方面,MAC/数据链路层直接从 TCP 层获得最大可容忍的端到端时延信息,这涉及到了 MAC 层/数据链路层与 TCP 层之间的交互.为了给实时应用提供有服务质量保证的服务,减少系统分组超时率、尽可能提高系统吞吐效率、保证用户之间一定的公平性,本文算法的调度原则是:如果有即将超时的分组,则优先选择这样的分组进行传输;否则,选择信道状况相对好的用户进行传输.算法的详细描述如下:

在一个调度时隙内:

- (i) 如果有一个 uj 满足 $T_{wd}^{uj} + \xi_{uj}(t) + T_{tr}^{uj} \geq \psi_{uj}$, 则 BS 根据公式(10)选取用户 uj 为其传输数据,之后转至(iii); 否则转(ii).

$$uj = \arg \max_{T_{wd}^{uj} + \xi_{uj}(t) + T_{tr}^{uj} \geq \psi_{uj}} \xi_{uj}(t), uj=1, \dots, U \quad (10)$$

如果多于一个 uj 满足公式(10),则根据(ii)选取用户进行数据传输.

如果选中用户的信道处于状态 $State_0^{uj}$, 为了防止分组超时,则采用 BPSK(binary phase shift keying)调制方式进行数据传输,但此时,因信道状况不好而并不进行重传.

- (ii) 根据公式(11)选取用户 uj 为其传输数据.

$$uj = \arg \max_{T_{wd}^{uj} + \xi_{uj}(t) + T_{tr}^{uj} < \psi} \eta_{uj}(t) / \overline{\eta_{uj}(t)} \quad (11)$$

其中, $\overline{\eta_{uj}(t)}$ 是用户 uj 在过去时刻中的平均有效吞吐率(计算见第 4.2 节中公式(16)), $\eta_{uj}(t)$ 是预测的用户 uj 在时刻 t 的即时有效吞吐速率,设 M_i 是该时刻用户 uj 选择的调制方式,则

$$\eta_{uj}(t) = R \cdot S_r(M_i) \cdot (N_p / (N_h + N_p)) \cdot (1 - \varepsilon_i^{uj}(M_i)) \quad (12)$$

如果有多个 uj 满足公式(11),则在这些用户中随机选取一个用户为其进行数据传输.

- (iii) 为所有用户更新队列 $Q_{uj}, \xi_{uj}(t)$ 和 $L(Q_{uj}, t)$, 丢弃超时分组.

4 性能指标

针对异构网络上实时应用的特点,选择系统分组超时率、平均有效吞吐率和公平性来作为算法性能指标.

4.1 系统分组超时率

因为忽略了分组在有线链路段的传输超时,系统的分组超时率可以通过计算应用在无线链路段的超时率来获得.这里定义系统的分组超时率为系统中超时分组总数与总的传输分组数之比,可以根据下式计算得到:

$$TOR_{system} = \frac{\sum_{uj=1}^U \sum_t A_{uj}(t)}{\sum_{uj=1}^U \sum_{i=1}^N S_r \cdot D_i^{uj}} \quad (13)$$

其中, $A_{uj}(t)$ 为基站端用户 uj 的缓存队列中超时分组数, $A_{uj}(t) = \sum_{k=1}^{L(Q_{uj}, t)} \mathbb{1}\{T_{wd}^{uj}(Q_{uj}(t), k) + T_{wq}^{uj}(Q_{uj}(t), k) > T_{ee}^{uj} - T_f\}$.

4.2 系统平均有效吞吐率

定义系统平均有效吞吐率($\bar{\eta}_{sys}$)为单位时间内系统平均传输的不包含重传数据在内的有效载荷,单位为 bits/s. 设 $\bar{\eta}_{uj}$ 为用户 uj 的平均有效吞吐速率,则可同理定义 $\bar{\eta}_{uj}$ 为

$$\bar{\eta}_{uj} = \text{total data payload throughput on data link layer} / (\text{average number of transmissions} \times \text{time used}) \quad (14)$$

因而可得系统的平均有效吞吐速率为

$$\bar{\eta}_{sys} = \sum_{uj=1}^U \bar{\eta}_{uj} \quad (15)$$

假设重传分组使用与原始传输分组相同的调制方式,设 R 为无线链路段的传输速率(单位为 bits/s), S_r 为符

号速率(单位为 bits/symbol), D_i^{uj} 为用户 uj 的分组在调制方式 M_i 时分组传输次数, 则 $\bar{\eta}_{uj}$ 可计算如下:

$$\bar{\eta}_{uj} = \left(\sum_{i=1}^N R \cdot S_r \cdot (N_p / (N_h + N_p)) \cdot (1 - \varepsilon_i^{uj}) \cdot D_i^{uj} \right) / \sum_{i=1}^N D_i^{uj} \quad (16)$$

4.3 公平性

PF(proportional fair)算法已被证明可以最大化目标函数 $\sum_{i=1}^M \log\{B_i\}$, 其中, B_i 是用户 i 在数据链路层的吞吐^[10]. 本文类似地定义公平性指标 Θ 来评估算法的公平性:

$$\Theta = (1/U) \cdot \sum_{uj=1}^U \log\{\bar{\eta}_{uj}\} \quad (17)$$

由公式(17)可知, Θ 的值越大, 算法相对越公平. 值得注意的是, 因文献[4]中已经证明了本文所采用的信道划分方法可真正为用户提供确保 PER 性能需求的传输服务, 所以本文不再把 PER 作为算法性能的一个衡量指标.

5 仿真

5.1 仿真主要参数

本节中给出算法的仿真分析, 通过与 MPF, EDF 和 M-LWDF 算法进行比较, 从分组超时率、系统平均有效吞吐率和公平性 3 个方面对算法进行评估. 本文仿真了一个包括有线链路和无线链路部分的异构网络, 在无线链路段, 一个小区中包括一个基站, 多个用户; 无线链路段的传输速率 R 为 1Mbps, 链路层分组长度为 1080, 最大重传次数为 3, 帧长 $T_f=2$ ms; 有线链路段分组传输时间为 50ms, 实时应用最大可容忍的端到端时延为 100ms. 表 1 为系统支持的调制方式.

Table 1 Modulation modes support by the system

表 1 系统支持的调制方式

Channel state	State ₀	State ₁	State ₂	State ₃	State ₄	State ₅	State ₆
Index of modulation mode	-	1	2	3	4	5	6
Modulation mode	-	BPSK	QPSK	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
Symbol rate (bits/symbol)	-	1	2	3	4	5	6

5.2 情形1

为了方便起见, 首先假设小区中每个用户信道为瑞利衰落信道且具有相同的 SNR 值, 分组以参数为 λ 的泊松分布到达 BS. 本文给出了 4 种情况的仿真: 一是载频 1.9GHz、速度 5km/h, 即最大多普勒频移为 8.796 3, 系统目标 PER 不大于 0.01, $\lambda=1.6$; 二是载频 1.9GHz、速度 5km/h, 即最大多普勒频移为 8.796 3, 系统目标 PER 不大于 0.1, $\lambda=2$; 三是载频 2.4GHz、速度 5km/h, 即最大多普勒频移为 11.111 1, 系统目标 PER 不大于 0.1, $\lambda=1.6$; 四是载频 2.4GHz、速度 5km/h, 即最大多普勒频移为 11.111 1, 系统目标 PER 不大于 0.1, $\lambda=2$.

图 3~图 5 分别描绘了算法在分组超时率、平均系统有效吞吐率和公平性 3 个方面的性能. 从图 3 可以看出, RTCLA 算法在分组超时率性能方面有较好表现, 比 MPF, EDF, M-LWDF 算法更适用于对时延敏感的实时应用. 从图 3 和图 4 中可以看出, RTCLA 算法在 4 种情况下的分组超时率性能上, 基本上与 EDF 算法结果相同, 但在吞吐性能上却远远优于 EDF 算法, 尤其是在分组到达率较低的时候 ($\lambda=1.6$). RTCLA 算法在吞吐性能上虽低于在此性能上表现突出的 MPF 算法, 但在分组超时率性能上却远远高于 MPF 算法 (至少改善了 3 倍以上), 而且从仿真结果来看 (如图 3 所示), MPF 算法由于分组超时率过高, 根本无法为实时应用提供有时延保证的服务. 而与 M-LWDF 算法相比, 当分组到达率较低时 ($\lambda=1.6$), 随着用户数目的增加, RTCLA 算法在分组超时率上比 M-LWDF 算法改善了至少 1 倍以上; 当分组到达率较高 ($\lambda=2$)、在用户数目多于 6 人时, RTCLA 算法在分组超时率上比 M-LWDF 算法改善了至少 60% 以上. 在公平性方面, RTCLA 算法介于 MPF 和 EDF 算法之间, 好坏相差不超过 1%, 在分组率较低时 ($\lambda=1.6$), 与 M-LWDF 算法表现基本相同.

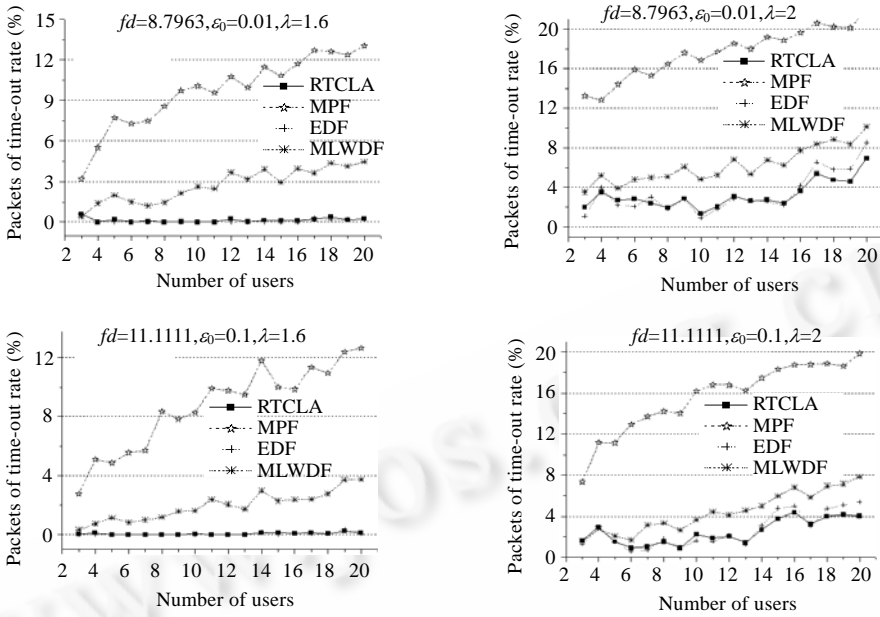


Fig.3 Packets time-out rate in case 1
图3 算法在情形 1 下的分组超时率

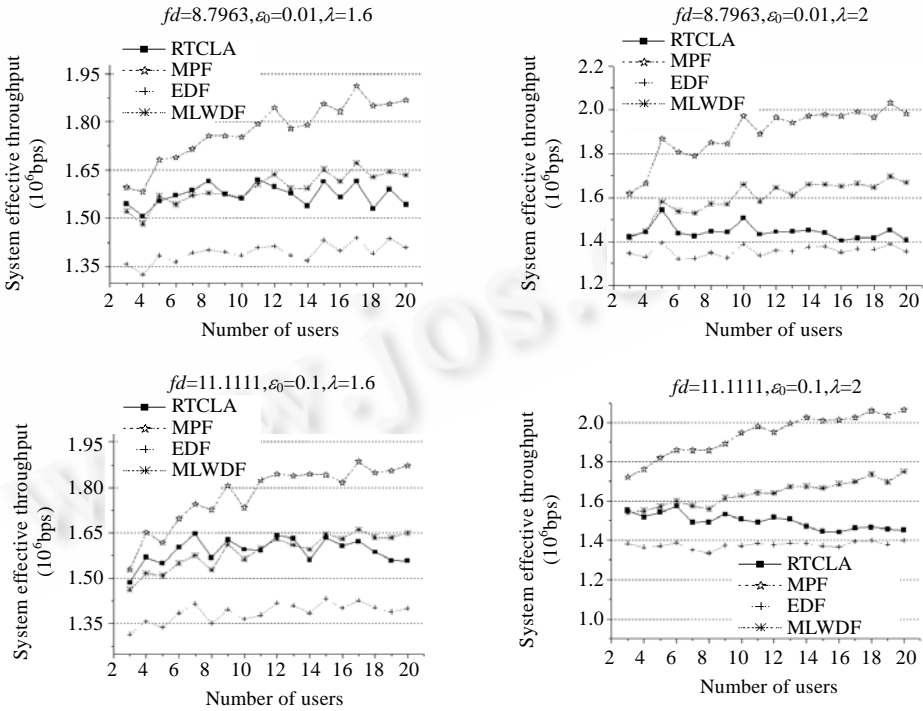


Fig.4 System average effective throughput in case 1
图4 算法在情形 1 下的系统平均有效吞吐率

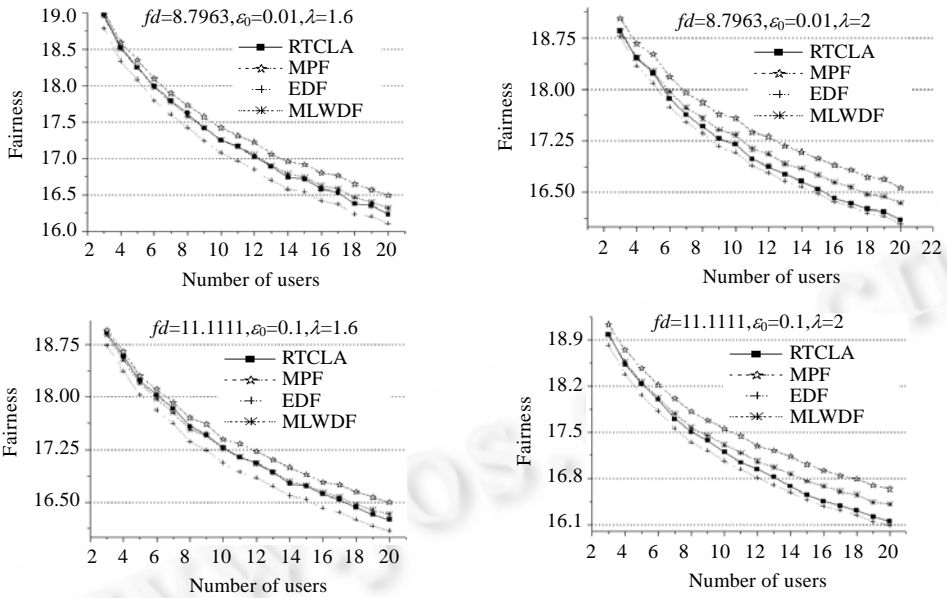


Fig.5 Fairness in case 1
图 5 算法在情形 1 下的公平性

5.3 情形2

在实际的网络中,用户的信道状况很可能不相同,所以,本节仿真了各用户信道的平均信噪比不同的情况.在本节的仿真中,主要的仿真参数为:载频 2.4GHz、速度为 5km/h,应用要求的系统误包率要小于 0.1,分组的到达过程亦为参数为 λ 的泊松过程到达数据链路层.仿真结果如图 6 所示.

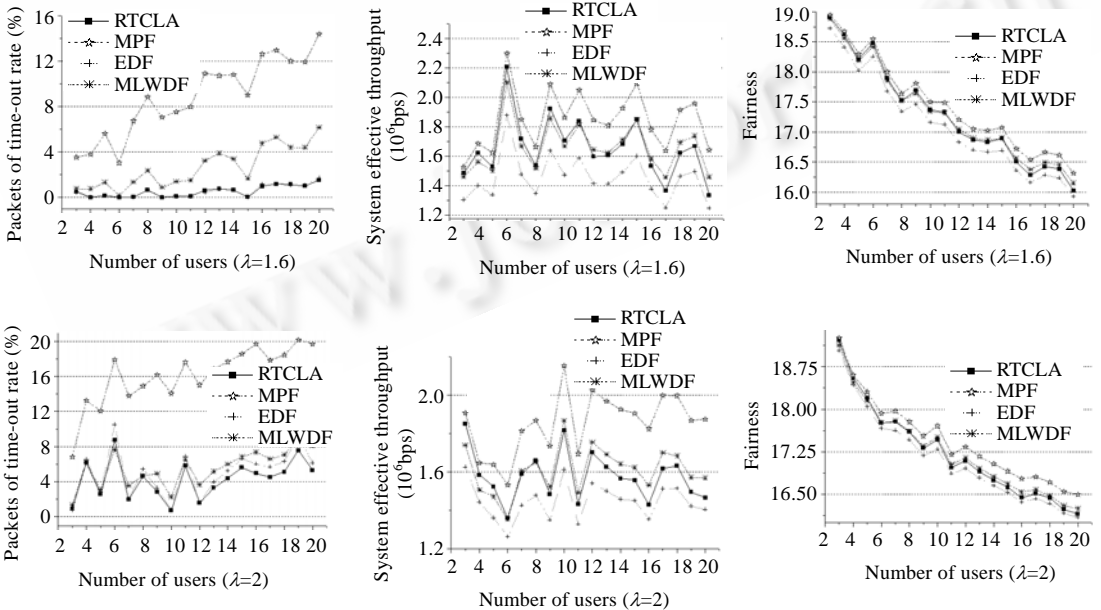


Fig.6 Performance of RTCLA in case 2 (packets time-out rate, system average effective throughput and fairness)
图 6 RTCLA 算法在情形 2 下的系统性能(分组超时率、系统平均有效吞吐量、公平性)

由图 6 可以看出,RTCLA 算法在分组超时率方面仍然表现良好,远远优于 MPF 算法,性能改善至少在 1 倍以上;虽然在吞吐性能方面,RTCLA 算法不如 MPF 算法,但 MPF 算法在仿真中过高的分组超时率无法满足实时应用的 QoS 要求.RTCLA 算法在分组超时率性能上的表现基本与 EDF 算法相同或略好于 EDF 算法,但在吞吐性能方面却比 EDF 算法有明显改善(高于 10%).当分组到达率较低时($\lambda=1.6$),RTCLA 算法的表现基本上都远远优于 M-LWDF 算法(用户数目超过 16 时,RTCLA 算法的吞吐性能才略低于 M-LWDF 算法);当分组到达率较高时($\lambda=2$),随着用户数目的增加,RTCLA 算法虽然在吞吐性能上的表现略低于 M-LWDF 算法,但在分组超时率性能上却明显优于 M-LWDF 算法.而在公平性方面,RTCLA 算法的表现与仿真情形 1 中相似.结合实时应用的 QoS 需求考虑,尤其是严格的端到端的时延要求,RTCLA 算法比其他 3 种算法更适合于无线网路段上的实时应用,能为此类应用提供较好的端到端服务质量的服务.

因为仿真中用户的信道状况都是随机产生的,所以,仿真结果与用户数目没有表现出明显的关系.

此外,本文还给出了算法稳定性的仿真结果(如图 7 所示).仿真参数为:载频 2.4GHz、速度为 5km/h,系统误包率要求小于 0.1,用户数 $U=10$ 人.无线链路中,用户信道状况可能不同,分组到达参数 $\lambda=1.6$.从图 7 中可以看出,与其他算法一样,RTCLA 算法在 8s 以后 3 个方面的性能基本到达稳定状态.值得注意的是,在 $\lambda=2$ 时,算法稳定性的仿真结果和 $\lambda=1.6$ 时的基本相同,受篇幅所限,本文未给出其结果图.

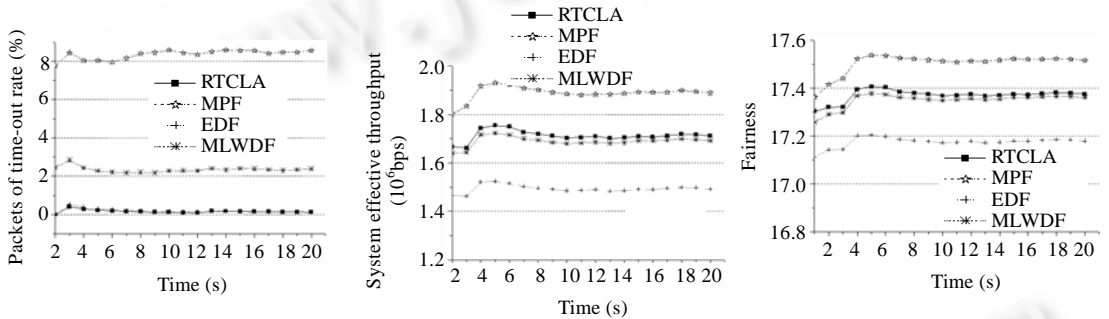


Fig.7 Stability of algorithms

图 7 算法的稳定性

6 结论

鉴于包含了有线链路和无线链路的异构网络中实时应用的严格时延要求,本文提出了一种用于无线网络中实时业务的、跨层间交互信息量小、易于实现的跨层调度算法 RTCLA.通过仿真,对算法的分组超时率、吞吐性能和公平性 3 个方面的性能进行了评估,并与广泛应用的 MPF,EDF 和 M-LWDF 这 3 种算法进行了对比.仿真结果表明,综合考虑对时延敏感的实时业务的 QoS 需求,就此类应用而言,RTCLA 在性能上优于其他 3 种算法.此外,在稳定性方面,RTCLA 与其他 3 种算法表现相同.

References:

- [1] Liu Q, Zhou S, Giannakis GB. Cross-Layer combining of adaptive modulation and coding with truncated arq over wireless links. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004,3(5):1746-1755.
- [2] Yun J, Kavehrad M. Markov error structure for throughput analysis of adaptive modulation systems combined with ARQ over correlated fading channels. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2005,4(1):235-245.
- [3] Xiao J, Qiu J, Cheng S. A joint adaptive packet size and modulation scheme combined with SR-ARQ over correlated fading channels. In: *Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*. Wuhan: IEEE Communications Society Press, 2005. 478-483. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1544080
- [4] Hao D, Xiao J, Zou S, Cheng S. Impact of feedback delay on system performance with AMC/SR-ARQ over rayleigh fading channels. In: *Proc. of the 2006 IEEE Int'l Conf. on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*. Wuhan: IEEE Communications Society Press, 2006. 1-5. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4149368

- [5] Zheng H, Visvanathan H. Optimizing ARQ performance in downlink packet data systems with scheduling. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005,4(2):495–506.
- [6] Haleem MA, Chandramouli R. Adaptive downlink scheduling and rate selection: A cross-layer design. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005,23(6):1287–1297.
- [7] Johnson KB, Cox DC. An adaptive cross-layer scheduler for improved QoS support of multiclass data services on wireless systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005,23(2):334–343.
- [8] Zheng H, Viswanathan H. Optimizing TCP performance with hybrid ARQ and scheduler. In: *Proc. of the 14th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Beijing: IEEE Communications Society Press, 2003. 1785–1789. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1260422
- [9] Haleem MA, Chandramouli R. Joint adaptive rate control and randomized scheduling for multimedia wireless systems. In: *Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Communications*. Paris: IEEE Communications Society Press, 2004. 1500–1504. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1312761
- [10] Klein TE, Leung KK, Zheng H. Improved TCP performance in wireless IP networks through enhanced opportunistic scheduling algorithms. In: *Proc. of the IEEE GLOBECOM 2004*. Dallas: IEEE Press, 2004. 2744–2748. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1378854
- [11] Liu Q, Zhou S, Giannakis GB. Cross-Layer scheduling with prescribed QoS guarantees in adaptive wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005,23(5):1056–1066.
- [12] Kim H, Kim K, Han Y, Yun S. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Vehicular Technology (VTC-2004-Fall)*. Los Angeles: IEEE Communications Society Press, 2004. 409–413. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1400034
- [13] Serensen TB, Pons MR. Performance evaluation of proportional fair scheduling algorithm with measured channels. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Vehicular Technology (VTC-2005-Fall)*. Dallas: IEEE Communications Society Press, 2005. 2580–2585. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1559016
- [14] Ameigeiras P, Wigard J, Mogensen P. Performance of the M-LWDF scheduling algorithm for streaming services in HSDPA. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Vehicular Technology (VTC-2004-Fall)*. Los Angeles: IEEE Communications Society Press, 2004. 999–1003. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1400171
- [15] Liu Q, Zhou S, Giannakis GB. Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: Cross-Layer analysis and design. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005,4(3):1142–1153.
- [16] Ma Q. Practical multiuser diversity with outdated channel feedback. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2005,54(4):1334–1345.
- [17] Doufexi A, Armour S, Butler M, Nix A, Bull D, McGeehan J, Karlsson P. A comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a wireless LAN standards. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(5):172–180.
- [18] IEEE P802.16e/D12. Draft IEEE standard for local and metropolitan area networks—Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. 2005.
- [19] Liu Q, Zhou S, Giannakis GB. TCP performance in wireless access with adaptive modulation and coding. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Communications (ICC 2004)*. Paris: IEEE Communications Society Press, 2004. 3989–3993. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1313300



郝丹丹(1973—),女,江苏南京人,博士,主要研究领域为无线资源管理,无线网络跨层设计及性能.



程时端(1940—),女,教授,博士生导师,主要研究领域为通信网,计算机网.



邹仕洪(1978—),男,博士,副教授,主要研究领域为移动无线网络,网络性能与服务质量.