

# 移动 Ad Hoc 网络中一种分布式 QoS 保证的多址接入协议

刘 凯, 王大鹏

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 基于随机竞争和冲突解决的思想, 本文为多跳移动 Ad Hoc 网络提出了一种分布式服务质量 (QoS) 保证的多址接入 (QMA) 协议. 该协议中, 节点在发送业务分组前利用预报突发进行竞争接入, 节点根据业务分组时延情况和最早失效优先原则确定预报突发的长度, 所发预报突发能持续到最后的节点优先获得接入. 同时, 具有实时业务的节点可以按照其优先级在更早的竞争微时隙中开始发送预报突发, 而非实时业务的节点只能在前面竞争微时隙空闲的情况下, 才能在后面的微时隙开始发送预报突发, 因此发送实时业务的节点可以比发送非实时业务的节点更优先接入信道, 从而在移动 Ad Hoc 网络中实现了对多媒体业务的 QoS 保证. 最后利用 OPNET 仿真评估了 QMA 协议的多址性能, 并与 IEEE 802.11e 协议的性能做了比较, 结果表明 QMA 协议可以提供较高的吞吐量和较低的实时业务时延.

**关键词:** 移动 Ad Hoc 网络; 多址接入协议; 服务质量; 分布式预约; 冲突解决

**中图分类号:** TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 11-2067-05

## A Distributed QoS-Guaranteed Multiple Access Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

LIU Kai, WANG Da-peng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the concept of random contention and collision resolution, a distributed quality-of-service-guaranteed multiple access (QMA) protocol for ad hoc networks is proposed to support multimedia service and multi-hop architecture. In the protocol, nodes broadcast forecast bursts (FBs) to access channel resources before their packets transmissions based on their recent packet delay and the earliest deadline first (EDF) principle, and the one that broadcasts the most FBs gets right to use the channel. Meanwhile, the nodes with real-time traffic can access channel prior to those with non real-time traffic by broadcasting FBs from earlier FB mini-slots, while the nodes with non real-time traffic are allowed to start to broadcast FBs on condition that all the former FB mini-slots for real-time traffic are idle. Therefore, the proposed protocol can provide QoS guarantees for multimedia traffic in mobile ad hoc networks. Finally, by the means of simulations in OPNET modeler, it is shown that the QMA protocol outperforms the IEEE 802.11e protocol in terms of throughput and average packet delay, especially for real-time traffic.

**Key words:** mobile ad hoc network; multiple access protocol; quality-of-service (QoS); distributed reservation; collision resolution

### 1 引言

移动 Ad Hoc 网络是由若干移动自组织节点组成, 不需要固定基础设施支撑的多跳无线网络. 其中的关键技术之一是多个节点共享公共信道资源的方式, 即多址接入 (或媒体接入控制, MAC) 协议, 其目标是实现各节点快速、高效、公平地共享信道资源.

目前, 移动 Ad Hoc 网络中的多址接入协议一般分

为随机接入协议和按需接入协议. 随机接入协议中, 节点在发送分组前先在信道上进行载波侦听, 如果信道忙, 节点将随机等待一段时间后再侦听接入; 如果信道空闲, 它将尝试接入信道, 并且引入了冲突解决机制来使可能的分组碰撞得到有序解决. 经典的随机接入协议是 IEEE 802.11 分布式协调功能 (DCF) 中采用的具有请求发送/允许发送 (RTS/CTS) 握手机制的载波侦听多址接入协议<sup>[1]</sup>, 与没有握手的带冲突避免的载波侦听多址

接入(CSMA/CA)协议相比,它能够将隐藏终端(定义为在发送节点一跳之外但在接收节点一跳之内的节点)造成的分组碰撞时间由较长的数据分组长度减少到较短的 RTS、CTS 分组长度,从而大大降低了分组碰撞率,提高了吞吐量。但是,随着网络业务量的进一步增加,分组碰撞概率的增大仍然会使多址性能急剧下降<sup>[2,3]</sup>。按需分配协议主要利用中心控制节点采用预留或轮询的方式来为邻节点分配信道资源,例如 IEEE 802.11 MAC 协议的点协调机制(PCF)<sup>[1]</sup>和分布式分组多址接入(D-PRMA)协议<sup>[4]</sup>。但是随着无业务节点数量的增加,完成分组发送所需要的开销和分组时延会相应增加。

为了在分布式 Ad Hoc 网络中支持多媒体业务,MAC 协议的服务质量(QoS)保证变得至关重要。通常,现有支持 QoS 的 MAC 协议都是通过调整与竞争相关的参数来实现区分服务。例如 IEEE 802.11e 协议<sup>[5]</sup>中增强的分布式协调功能(EDCF)通过给不同的业务流分配不同的竞争参数,如竞争窗口大小和帧间隔(IFS),可以提供 4 种接入类别(AC),支持 8 个优先级。但是当业务量较大时,多跳网络中高优先级分组的时延并不能得到保证,因为在两跳内连续交替进行的低优先级分组传输可能使处于其间具有高优先级业务的节点被阻塞,并且协议中启动 RTS/CTS 握手没有时间限制,也导致了实时业务分组无法全部得到时延保证。为了提高协议性能,出现了基于 IEEE 802.11 系列的改进协议。文献[6]在不同业务量下,调节初始退避窗口大小来保证一跳网络的 QoS 性能。Ad Hoc 实时业务 QoS 协议(QPART)<sup>[7]</sup>在多跳网络中针对三种不同要求的业务使用 MAC 层竞争窗口调节参数来实现 QoS 调度,保证了获得接入许可的实时业务传输量始终低于网络的传输容量,以此来保证网络的 QoS 性能。在考虑了多跳网络后,文献[8]提出使用冲突避免间隔(CAI)代替原先 IEEE 802.11 协议中的网络分配向量(NAV),因为 NAV 的长度可能不足以避免一跳范围外的碰撞;文献[9]提出了一种基于 IEEE 802.11 MAC 协议的扩展协议,通过引入新的控制分组,使接收节点可以拒绝发送节点的数据传输请求,确保了重业务负荷条件下高优先级业务的优先权。除了 IEEE 802.11 系列和基于它的改进协议,研究者也提出一些新的竞争机制,如欧洲制定的 HIPERLAN 协议<sup>[10]</sup>中,节点根据分组的优先级和时延在不同竞争阶段的时隙中发送突发(Burst)来获取信道,这种机制需要在竞争期开始时对参与竞争的节点进行同步,这一点要在移动 Ad Hoc 网络,尤其是全分布式 Ad Hoc 网络中实现需要增加很多开销。

为了在全分布式的多跳移动 Ad Hoc 网络内实现高效接入控制,本文综合了区分优先级的竞争和冲突解决的机制,提出了分布式 QoS 保证的多址接入(QMA)协

议。

## 2 基本假设

本文采用灵敏载波侦听的无线网络模型<sup>[8]</sup>,即载波信号的覆盖范围在距离上可分为两个区域:一个是分组传输区,另一个是载波侦听区。在分组传输区,接收机能够侦听到并正确接收分组;而在载波侦听区,接收机只能侦听到载波信号而无法正确接收,即当节点之间距离超过一跳通信范围时接收到的信号小于正确接收分组所需功率,但是可以通过比较载波信号强度是否高于另一个较小的门限来判断两跳通信范围内的信道是否被占用。假定接收机能够监听到发射机载波的距离是它可以正确接收分组的距离的 2 倍,这一点可以通过设定监听载波信号强度的门限来实现。这样,节点在 MAC 层通过判断两跳通信距离内信道的占用情况,从而消除了正常通信时隐藏终端可能造成的碰撞。

## 3 QMA 协议

本文提出的 QMA 协议可以支持两种业务类型:分别为时延敏感的实时业务和无时延敏感的非实时业务。由于实时业务的时延敏感性,发送失败后再重传很可能已经失去分组的时效性,所以协议中实时业务发送一次后不再重传。当节点有业务分组需要接入信道时,它首先侦听信道,如果信道空闲一个窗口时间  $T_{win}$  后,就可以按照本协议进行接入;否则,节点退避。接入点后划分有若干个预报突发(FB)微时隙  $T_{FB}$  ( $T_{FB} < T_{win}$ ),  $T_{FB}$  的大小至少为最大信号传播时延、收发转换时间和接收机监测时间之和,总共有  $(n+m)$  个微时隙,其中前  $n$  个微时隙用于实时业务选择 FB 起始微时隙,后面  $m$  个微时隙用于非实时业务选择 FB 起始微时隙。为了区分实时业务和非实时业务,有实时业务待发的节点在前  $n$  个微时隙中开始竞争信道使用权,而有非实时业务待发的节点只有在前  $n$  个微时隙都空闲的情况下,才能在随后的  $m$  个微时隙中开始竞争信道使用权。节点根据要发送业务的优先级确定从第几个(如第  $I$  个)微时隙开始发送 FB,如果某个接入节点在监测到第  $I$  个之前的微时隙都空闲,它就从第  $I$  个时隙开始发送 FB,长度为  $K$  个;否则,表明有更高优先级业务已经开始发送,本节点退出竞争。其中  $I$  服从参数为  $q$  的截短几何概率分布, $q$  的大小应该与业务的优先级和时延有关。

若节点发送实时业务,则  $I$  的概率分布如下:

$$P(I=i) = \begin{cases} (1-q)q^{i-1} & 1 \leq i < n \\ q^{n-1} & i = n \end{cases}$$

若节点发送非实时业务,则  $I$  的概率分布如下:

$$P(I = i) = \begin{cases} (1 - q)q^{i-n-1} & n + 1 \leq i < n + m \\ q^{m-1} & i = n + m \end{cases}$$

$K$  的数值应该与业务的优先级和时延有关, 优先级越高,  $K$  就越大, 按照 EDF (Earliest Deadline First) 准则,  $K$  的大小应该与实时分组的时延  $D$  成正比, 即  $K \propto D/D_{\max}$ , 其中  $D_{\max}$  为业务的最大允许时延. 在节点发完这  $K$  个预报突发后, 它将侦听信道, 这样经过  $T_{obs}$  长时间它就可以确定此时信道的状态,  $T_{obs}$  的大小为最大信号传播时延、收发转换时间和接收机监测时间之和. 如果信道忙, 说明还有更高优先权的业务在接入信道, 则它本次没能接入信道, 而进行退让; 如果信道空闲, 则它获得信道使用权, 可以立刻发送相关业务. 如图 1 所示, 节点 A、B 在相同的竞争时隙开始预报突发, 而节点 C 按分组优先级和时延确定的开始间隙晚于 A、B 的预报突发, 则 C 会在监听到信道已经被占用后选择退避, 等待下一次竞争接入; A 比 B 具有更长的预报突发, 所以 A 竞争成功可以接入信道, 而 B 竞争失败.

在发送预报突发时, 本协议规定前  $(I - 1)$  个时隙都空闲的情况下, 节点才能选定第  $I$  个微时隙开始发送 FB, 这就保证了只有在相同微时隙开始发送的节点才有权进入发送候选者之列, 并且它们是当前业务发送中优先级最高的节点, 同时, 所发 FB 越长的节点享有越高的接入权, 这样具有较高优先级和最早失效分组的节点可以通过较早开始发送较长的 FB 来获得优先接入, 达到 QoS 保证的目的. 在业务量增大时, 可以适当增大  $n$  与  $m$  以便获得满意的接入效率, 即降低接入时延、提高吞吐量.

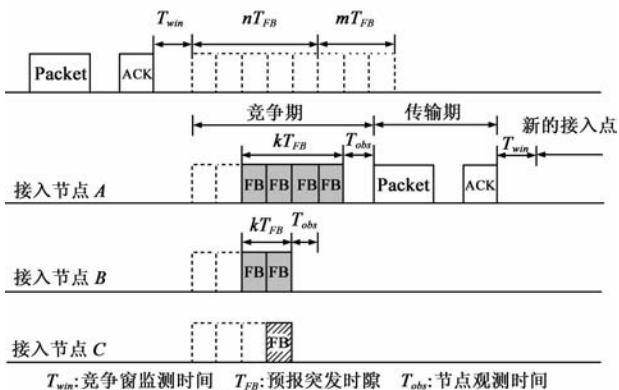


图 1 QMA 协议示例

## 4 性能评估

### 4.1 仿真环境

传统业务模型一般是基于 Poisson 过程的, 但这并不能很好反映 Internet 业务中分组到达时间之间的相关性, 而用 on 和 off 的持续时间服从重尾分布 (如 Weibull 分布, Pareto 分布等) 的 on/off 过程来描述分组到达过程

更加接近 Internet 业务的实际情况, 尤其是实时业务方面. 本文选用 on 和 off 的持续时间服从 Weibull 分布的 on/off 过程模拟突发信源的分组产生.

Weibull 分布的分布函数为  $F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha}$ ,  $x \geq 0$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  ( $\alpha, \beta$  都是实数),  $\alpha$  称作形状参数, 它是信源突发程度的描述;  $\beta$  称尺度参数. 当  $\alpha = 1$  时, Weibull 分布就蜕化为指数分布, on/off 过程就变成了马尔可夫调制的 Poisson 过程 (MMPP). 当  $\alpha < 1$  时, 随着  $\alpha$  的越来越小, 分布的“重尾”性越来越明显, 即分组到达的突发性越来越强.

当节点中业务分组到达分别服从  $\alpha = 0.88$ ,  $\alpha = 0.7$  及  $\alpha = 0.65$  的 on/off 过程, 以及分组到达服从传统 Poisson 过程时, 我们对 QMA 协议的性能进行了仿真对比, 所有仿真中的节点平均业务量相同. 服从重尾分布的 on/off 信源参数如表 1 所示.  $\alpha_{on}$  和  $\alpha_{off}$  分别代表 on 期和 off 期的  $\alpha$  值,  $\beta_{on}$  和  $\beta_{off}$  分别代表 on 期和 off 期的  $\beta$  值. 实时业务 on 期的分组到达为恒定比特业务流; 非实时业务 on 期的分组到达为 Poisson 流, 平均到达率相同. 在 Poisson 模型仿真中, 协议参数相同, 分组到达率  $\lambda$  为 10 个/s.

表 1 服从重尾分布的 on/off 信源参数

$\alpha_{on} = \alpha_{off}$	$\beta_{on}$	$\beta_{off}$	on 期长度 均值/s	off 期长度 均值/s	on 期内分组 平均到达率
0.88	3.067	21.378	3.3	22.8	80
0.7	2.582	17.995	3.3	22.8	80
0.65	2.416	16.689	3.3	22.8	80

表 2 QMA 协议仿真参数

场景		信道	时隙					分组		
A	R	速率	m	n	$T_{win}$	$T_{FB}$	$T_{obs}$	q	$L_{FB}$	$L_{PKT}$
/km <sup>2</sup>	/km	/(Mb/s)	/个	/个	/μs	/μs	/μs		/bit	/bit
50 × 50	10	2	12	12	268	64	64	0.8	128	9250

仿真场景中, 所有节点随机分布在面积为 A 的区域中, 节点通信半径 R, 其中实时分组不重传, 非实时分组最大重传次数为 7. 表 2 列出了在 OPNET Modeler 中仿真的具体参数.

### 4.2 QMA 协议的性能

图 2 ~ 图 4 给出了使用 Poisson 及 on/off 业务模型时 QMA 协议的性能比较. 从图中可见, 当分组到达服从 Poisson 过程时, QMA 协议的性能相对更好, 即此时网络吞吐量高、平均分组丢弃率和时延低. 对于 on/off 突发业务, 随着  $\alpha$  值的减小突发性增强, 协议性能下降. 这是由于在一定时间段内观察, Poisson 业务流的分组到达比较均匀, 分组能够得到更及时的传输; 而 on/off 业务流的分组到达具有一定突发性, 分组在 on 期较为集中的到达, 使队列内的分组积压严重, 更多实时分组会超时而被丢弃; 同时节点竞争激烈也使冲突解决机制

要耗费更多开销,因而时延和丢弃率较高,吞吐量也受

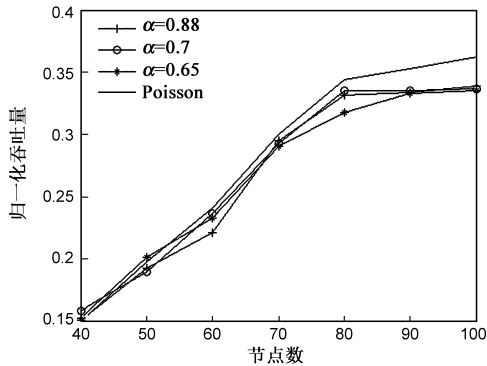


图2 归一化吞吐量

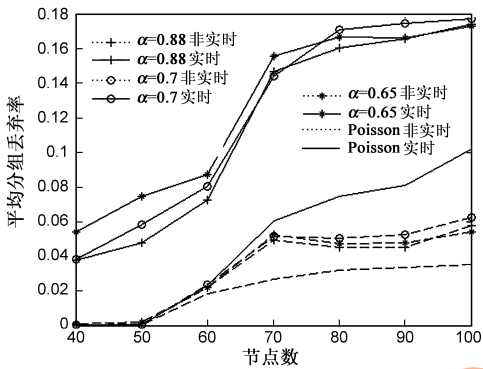
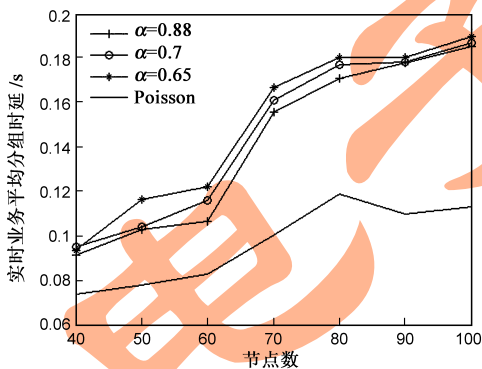
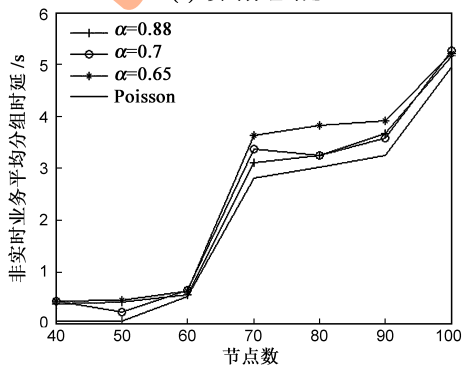


图3 平均分组丢弃率



(a) 实时分组时延



(b) 非实时分组时延  
图4

到一定影响.从图中也可以看出, on/off 信源下不同  $\alpha$  值对应的协议性能差别并不明显.网络在重业务负载

时(节点数大于 60),协议性能会有较大下降.从图3可以看出 QMA 协议通过重传机制保证了非实时业务分组传输的可靠性,其分组丢弃率控制在 6% 以下.而图4(a)表明 QMA 协议的实时分组通过在较早时隙开始预报突发优先地获得接入,因而其时延性能得到保证.

### 4.3 与 IEEE 802.11e 协议的性能比较

图5、图6给出了在  $\alpha = 0.88$  时 on/off 业务模型下, QMA 协议和 IEEE 802.11e 协议 EDCF 支持实时和非实时业务分组的性能比较.在 EDCF 机制仿真中,实时和非实时业务分别对应 EDCF 接入类别的 AC0 和 AC3,即优先级最高和最低的两种业务类型.

从图中可以看出, QMA 协议支持实时业务的优先接入,保证了其平均分组时延可以限制在很小的范围内.但是随节点数增加,没有重传机制会使实时分组碰撞和丢失加重,其吞吐量与非实时分组吞吐量差距减小. IEEE 802.11e 协议的吞吐量会在节点数较大时有明显下降,尤其是低优先级的非实时分组,同时分组时延也会迅速增大,这是因为 IEEE 802.11e 协议没有完善的冲突解决机制,并且分组传输启动也没有时间限制.而 QMA 协议在一个较宽的负载范围(节点数小于 60)都可以有稳定的时延和吞吐量,所以它可以在多跳网络环

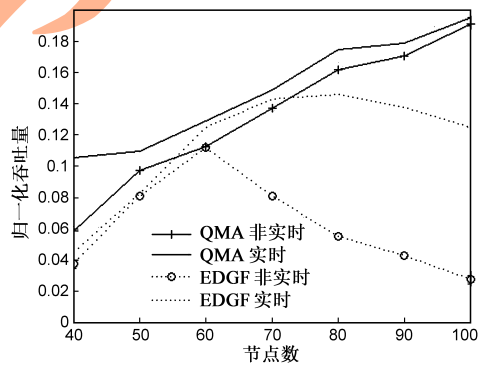


图5 QMA 协议与 IEEE 802.11e 协议吞吐量对比

境下为分组传输提供相对较好的 QoS 保证.图4(a)和图6中可以看出, QMA 协议的实时分组时延在仿真中可以限定在 0.2s 之内,是以非实时业务的时延性能为

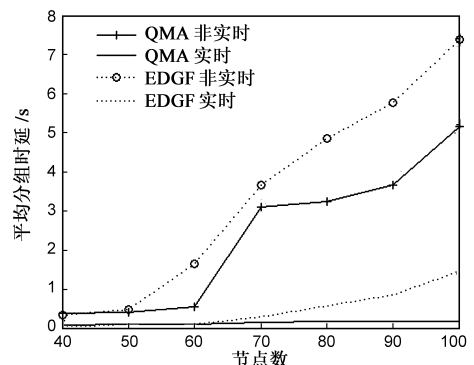


图6 QMA 协议与 IEEE 802.11e 协议时延对比

代价来保证实时分组的及时传输,而非实时业务通过重传来保证可靠送达,具有较小的分组丢弃率(见图 3)。

## 5 结论

本文为多跳移动 Ad Hoc 网络提出了一种可以支持 QoS 的分布式多址接入协议,即 QMA 协议。该协议综合了竞争预约和冲突分解的思想,节点通过发送不同起始微时隙和长度的预报突发分组来竞争接入信道,大大减少了业务分组之间的碰撞,并且通过区分预报突发的开始微时隙来保证实时业务的 QoS 要求。通过仿真验证和比较,表明了 QMA 协议可以提供高效的信道共享机制,保证多媒体业务的不同 QoS 要求。

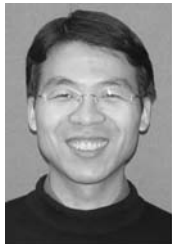
## 参考文献:

- [1] IEEE standard for Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. 1999.
- [2] CHEN Y, ZENG Q A and AGRAWAL D P. Performance analysis and enhancement for IEEE 802. 11 MAC protocol[A]. Proc IEEE ICT 2003[C]. Tahiti; IEEE, 2003, 860 - 867.
- [3] XU S, SAADAWI T. Does the IEEE 802. 11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?[J]. IEEE Commun Mag, 2001, 39(6): 130 - 137.
- [4] 李云. D-PRMA: 一种新的无线 Ad Hoc 网络资源预留 MAC 机制[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(6): 967 - 972.  
LI Yun. D-PRMA: A novel MAC mechanism supporting resource reservation for wireless Ad Hoc networks[J]. Journal of

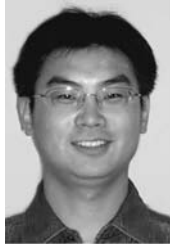
Electronics & Information Technology, 2005, 27(6): 967 - 972. (in Chinese)

- [5] YOON Hayoung, KIM JongWon and SHIN DongYun. Dynamic admission control in IEEE 802. 11e EDCA-based wireless home network[A]. Proc Consumer Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas; IEEE, 2006. 55 - 59.
- [6] YANG Xiao, YI Pan. Differentiation, QoS guarantee, and optimization for real-time traffic over one-hop Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(6): 538 - 549.
- [7] YANG Yaling, Kravets R. Distributed QoS guarantees for real-time traffic in ad hoc networks[A]. Proc. Sensor and Ad Hoc Communications and Networks(IEEE SECON)[C], California; IEEE, 2004. 118 - 127.
- [8] WOONG Chul Choi, et al. End-to-end performance improvements for multi-hop ad-hoc wireless networks[A]. Proc. Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems[C]. Vienna; IEEE, 2004. 53 - 57.
- [9] 王朝翔, 等. 带区分服务扩展的 802. 11 MAC 协议及其性能分析[J]. 通信学报, 2007, 28(3): 1 - 7.  
WANG Z X, et al. Class of service extension of 802. 11 MAC protocol and performance analysis[J]. Journal on Communications, 2007, 28(3): 1 - 7. (in Chinese)
- [10] ANASTASI G, LENZINI L, MINGOZZI E. HIPERLAN/1 MAC protocol: stability and performance analysis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(9): 1787 - 1798.

## 作者简介:



刘 凯 男, 1973 年出生于甘肃酒泉, 北京航空航天大学电子信息工程学院副教授。分别于 1994、1997 和 2001 年在西安电子科技大学获得工学学士、硕士和博士学位。主要研究领域为无线个人通信、移动 Ad Hoc 网络、无线接入、无线局域网、无线传感器网络和空地一体化网络。E-mail: liuk@buaa.edu.cn



王大鹏 男, 1982 年出生于山东潍坊, 现为北京航空航天大学交通信息工程及控制专业硕士研究生。主要研究领域为 Ad Hoc 网络的 MAC 协议。E-mail: bjwdp@sina.com