

无线 Mesh 网 QoS 研究

崔华力¹, 钱德沛^{1,2}, 刘 轶², 伍卫国¹, 彭 绯²

(1 西安交通大学 计算机系, 陕西 西安, 710049; 2 北京航空航天大学 中德软件技术联合研究所, 北京 100191)

摘 要: 无线 Mesh 网由于无线链路自身的不稳定性以及多跳传输带来的隐藏/暴露终端等问题, 使得提供 QoS 保障带来更大挑战. 对 Mesh 网各协议层为支持 QoS 所做的研究进行归纳, 总结分析了已有的支持 Mesh 网 QoS 的跨层设计方案. 指出了无线 Mesh 网络提供 QoS 保障的进一步研究方向.

关键词: 无线 Mesh 网; 服务质量; 跨层设计

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)04-0173-06

QoS Support in Wireless Mesh Networks: a Survey

CUI Hua-li¹, QIAN De-pei^{1,2}, LIU Yi², WU Wei-guo¹, PENG Fei²

(1 Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The unique features of wireless mesh network (WMN) such as unpredictable link properties and hidden and exposed terminal problems make the quality of services (QoS) control over WMNs more challenging. This paper presents a survey on the state-of-the-art WMN QoS control. First, layered QoS support strategies are analyzed. Then, several approaches of cross-layer QoS design for WMNs are introduced and analyzed. Open issues and further research topics are suggested.

Key words: wireless mesh networks; quality of service (QoS) support; cross-layer design

1 引言

无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Network, WMN)^[1-2]被定义作骨干网是静态无线网的分组交换网络, 广义的讲, 可将无线 Mesh 网看作是现有 Internet 的无线版本. 无线 Mesh 网由 Mesh 路由器和 Mesh 终端组成. 较之传统的无线路由器, Mesh 路由器配有多个无线接口, 并支持多种无线接入技术, 这些路由器通常预先安置, 它们构成了无线 Mesh 网的骨干网. Mesh 终端或静止或移动, 可直接接入到骨干网, 如传统的有线/无线终端、各种手持设备; 终端之间也可按某种形式组网后, 如组成 Ad Hoc 网络、无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN)、WLAN 等, 然后通过 Mesh 路由器接入.

与传统有线网络相比, 无线 Mesh 网的特性使得对 QoS 的保障变得更加具有挑战性. 这包括无线链路本身的不稳定性和不可预测性, 多跳特征带来的隐藏/暴露终端问题、链路中断和路由重建问题等.

2 分层协议对 QoS 的支持

2.1 MAC 层 QoS

无线 Mesh 网 MAC 协议对 QoS 的支持主要通过三个方面: 优先级, 即对重要的数据流如语音和视频等分配较高的优先级; 资源预留, 预留成功后允许节点无冲突发送数据; 公平考虑, 即对无线媒体接入进行公平的共享.

Nityananda Sarma 等人基于 IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function), 提出了

收稿日期: 2009-07-20; 修回日期: 2009-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60673180); 国家“八六三”计划项目(2006AA01A109)

SPQAMP (Strict Priority Based QoS-Aware MAC Protocol) 协议^[3], 该协议确保了实时数据流总是可以获得信道使用权, 其主要是通过通过对实时数据和尽力而为数据分别设置严格的不重叠回退窗口来实现. 同时为了降低多跳传输带来的延迟, 对实时数据流的中继节点、源节点以及尽力而为的中继节点、源节点分配了降序优先级, 并依次指定了递增的竞争窗口. 文献[4]在随机初始化协议(Randomized Initialization Protocol)基础上提出一个多优先级的 MAC 层协议. 首先利用 BB(Black-Busrt)策略对节点的优先级进行区分, 从而可以按照优先级的不同对数据帧进行传输, 其次通过身份认证初始化, 对有着相同优先级的节点采用轮询方式进行数据传输. 这样就无需采用各种竞争解决策略, 从而极大的节省了网络带宽和传输时延.

文献[5]针对 CSMA/ID(Carrier Sense Multiple Access/ID Countdown)协议, 从公平性角度进行了改进, 提出了 DFIC (Differentiated Fair ID Countdown)和 CFIC (Controllable Fair ID Countdown)两种策略. 前者有效解决了多跳网络中相同优先级数据包的公平竞争问题, 而 CFIC 策略的目的是能够

让低优先级的数据包也有机会传送, 从而保证在所有节点的不同优先级数据包之间保持公平. 在文献[6]中, 为了保证所有竞争节点的公平接入, 把节点对信道的占用状态作为考虑因素, 提出一个增强的回退算法(Enhanced Back-off, E-back-off), 该算法避免了有着最小 CW 的节点总是可以获得信道的使用权的问题, 大大提高了网络的公平性.

随着多信道技术在 Mesh 网中的应用, 信道的分配调度问题成为 MAC 层研究的主要问题. 文献[7]提出了一个在多信道环境下提供 QoS 保障的 MAC 协议 MAC-MC(Multi-channel MAC). 该协议将无线信道分为一个控制子信道和 N 个服务子信道, 网络节点通过在控制子信道交换 RTS/CTS 信息来为数据包预留服务子信道. 文献[8]提出了一个双向多信道 MAC 协议 Bi-MCMAC (Bidirectional Multi-Channel MAC), 该协议将传输信道分成控制信道部分和数据信道部分, 对 RTS/CTS 握手进行扩展, 通过双向信道的预留来减少传输的数据和应答数据之间的冲突. 表 1 总结了 QoS 相关的无线 Mesh 网 MAC 协议.

表 1 QoS 相关 MAC 协议对比

文献	信道类型	QoS 手段	具体采取措施	QoS 保障
[3],[4]	单信道	优先级分类	根据严格的优先级, 设置竞争窗口	Delay, Throughput
[5],[6]	单信道	公平考虑	根据节点对信道的占用, 设置竞争窗口	Fairness
[7],[8]	多信道	资源预留	对多信道进行功能分类	Delay, Throughput

2.2 网络层 QoS

网络层在 QoS 的保障中, 起着非常重要的作用. 目前的研究主要集中在对已有路由协议的改进以及提出新的 QoS 路由判据方面.

2.2.1 QoS 路由协议

针对无线 Mesh 网特性, 选择多路径(Multi-path)传输, 不仅潜在的为实时数据流提供了高可用带宽, 同时可以减少由于节点移动或失效带来的路由中断, 因而是提高多媒体传输服务质量的重要手段. 杨超等人在文献[9]中, 提出了一种新的 Mesh 网络多径路由协议 WMRP(Wireless Mesh Route Protocol). 该协议将数据链路层的平面路由方法拉伸成类似于 IP 路由的多级路由框架, 使路由数据可以分层进行归类与聚合, 较大提高了协议的执行效率和可扩展性.

随着移动电视和视频会议的需求增多, 无线 Mesh 网的 QoS 多播路由(QoS Multicast Routing)也

成为一个研究的热点. 如利用网络拓扑预处理过程来实施网络流量工程并提高 QoS 多播路由的性能; 通过对邻居节点网络资源的估算, 限制参与多播的节点, 进而提高多播的效率.

2.2.2 新的路由判据

已有的 Mesh 网路由判据^[10]包括: Hop Count, ETX, ETT, WCETT, MIC, mETX, ENT 和 i-AWARE 等.

ETX(Expected Transmission Count)是指数据包在链路上成功发送时的期望发送次数, 其计算公式如下:

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r}$$

其中, d_f 代表了从发送端到接收端成功传输报文的比率, d_r 则代表了反方向成功传输报文的比率, 节点通过向邻居节点发送探测包计算二者的值. ETX 依据传输成功比率计算, 它直接影响着吞吐率的大

小,从而达到提高端到端网络吞吐率的目的。

Richard Draves 等人提出 ETT(Expected Transmission Time),与 ETX 不同的是它兼顾了不同链路之间的差异,ETT 的计算如下:

$$ETT = ETX \frac{S}{B}$$

其中, S 和 B 分别代表了报文的大小和链路的带宽。

随后,为了减少在一条路径上使用同一信道传输报文的节点数目,同时考虑到数据流的内部传输干扰,在 ETT 基础上提出了 WCETT(Weighted Cumulative ETT),在一条路径 p 上,其计算公式如下:

$$WCETT(p) = (1 - \beta) \sum_{link \ l \in p} ETT_l + \beta \max_{1 \leq j \leq k} X_j$$

其中, $0 \leq \beta \leq 1$ 是可调参数,用来在获得低时延和高吞吐量之间进行均衡。 X_j 是指路径 p 使用信道 j 的次数,式中的 $\max_{1 \leq j \leq k} X_j$ 即表示在路径 p 中,信道 j 出现的最大次数。

针对 WCETT 没有考虑数据流之间的相互干扰,并且不满足保序性的问题, MIC(Metric of Interference and Channel-switching) 判据被定义如下:

$$MIC(p) = \frac{1}{N \times \min(ETT)} \sum_{link \ l \in p} IRU_l + \sum_{node \ i \in p} CSC_i$$

其中, N 指的是网络中总的节点数, IRU (Interference-aware Resource Usage) 和 CSC (Channel Switching Cost) 分别定义如下:

$$CSC_i = \begin{cases} w_1 & \text{if } CH(\text{prev}(i)) \neq CH(i) \\ w_2 & \text{if } CH(\text{prev}(i)) = CH(i) \end{cases}$$

$$0 \leq w_1 \leq w_2$$

N_l 是干扰链路 l 传输的节点集合, $CH(i)$ 是指分配给节点 i 传输的信道, $\text{prev}(i)$ 是路径 p 上节点 i 的上一跳节点。

对于无线多跳网络来说,选择最小跳数作为路由判据,已被证明是不合适的。各种新的路由判据在不断完善需要考虑的网络因素:链路传输成功的比率、路径上各信道之间的干扰、传输路径之间的相互干扰以及传输信道的不稳定性等。由此看来优化传输路径,提高服务质量,需要从网络本身的特性出发,将多个路由判据综合考虑,并兼顾多层网络协

议,进而找出结合点。

表 2 是上述几种 QoS 路由判据的对比。

表 2 QoS 路由判据比较

路由判据	流内干扰	流间干扰	链路时变	QoS 保障
ETX	×	×	×	Throughput
ETT	×	×	×	Throughput
WCETT	✓	×	×	Throughput, Delay
MIC	✓	✓	×	Throughput
mETX, ENT	✓	×	✓	Packet Loss
iAWARE	✓	✓	✓	Throughput

2.3 传输层 QoS

目前针对 Mesh 网拥塞控制^[11]的技术手段主要包括调节滑动窗口的大小、设置 TCP 重传定时器、显式报文反馈以及邻节点拥塞信息共享等。

由于优先级高的多媒体流的存在,使得一般数据流在传输过程会产生较大的延迟,此时,上层 TCP 会认为该数据包丢失,进行重传。RE-TCP(Resource Efficiency TCP)协议通过 MAC 层获取链路的状况,并据此来调节 TCP 重传定时器,从而减少了由于链路竞争引发的数据包重传,提高了对网络带宽资源的利用。

Kun Tan 等人提出的 EWCCP(Explicit Wireless Congestion Control Protocol)协议,采用了显式的多比特反馈。每一个数据包都加载了一个特殊的拥塞数据包头,传输路径上的路由器基于无线链路相邻节点队列长度计算拥塞信息,将结果加载到数据包头进行反馈,发送端根据收到的反馈信息来调节发送窗口的大小。

Sumit Rangwala 等人提出了一种无线控制协议 WCP(Wireless Control Protocol),认为产生拥塞的不只是节点本身,而应考虑整个邻居群节点。进而引入了拥塞共享概念,即若链路 $i \rightarrow j$ 发生拥塞,就将拥塞信息通知给所有与 i 和 j 相邻的节点进而进行控制。接着又提出了带有容量预测的控制协议 WCP-Cap(Wireless Control Protocol with Capacity estimation),使得网络的公平性和效率等方面得到了提高。表 3 是几种改进 TCP 协议的对比。

表 3 TCP 协议改进策略比较

协议名称	实施方法	QoS 保障	邻节点状态
TCP-SF	改变 TCP 拥塞窗口大小	Throughput	不考虑
RE-TCP	调节 TCP 重传定时器	Throughput, Packet Loss	不考虑
EWCCP	采用显式报文反馈	Fairness	考虑
WCP, WCP-Cap	拥塞共享机制	Throughput, Fairness	考虑

3 跨层 QoS 设计

跨层设计允许协议上层获知底层网络状况, 而根据链路的当前状态及时调整传输路径和发送速率, 这对于链路不稳定, 易受干扰的无线网络来说显得尤为合适.

3.1 Mesh 网跨层 QoS 模型

Gahng-Seop Ahn 等人提出的 SWAN 模型, 如图 1 所示.

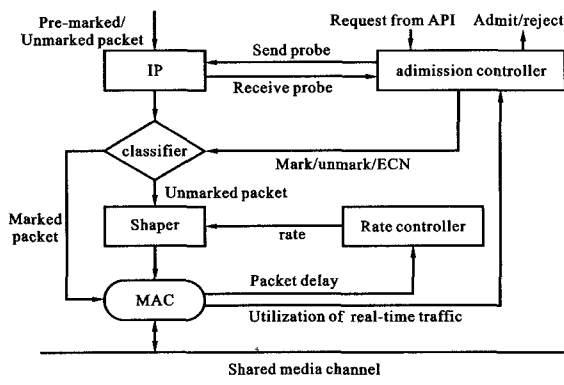


图 1 SWAN 终端模型

图 1 中, 报文从 IP 层传出后, 分类模块检测该报文是否有标签, 即判断是实时数据或尽力而为数据, 若是实时数据则直接将其送至 MAC 层, 整形模块根据速率控制模块的控制对尽力而为数据包产生一定时延. 接纳控制模块通过发送探测报文和来自 MAC 层的信息来决定是否接纳一个外来的请求.

SWAN 没有对有线和无线网络进行区分, 未考虑无线 MAC 的竞争以及多跳路径之间的相互干扰, 基于此 Yuan Sun 等人提出一个改进的 QoS 模型如图 2 所示.

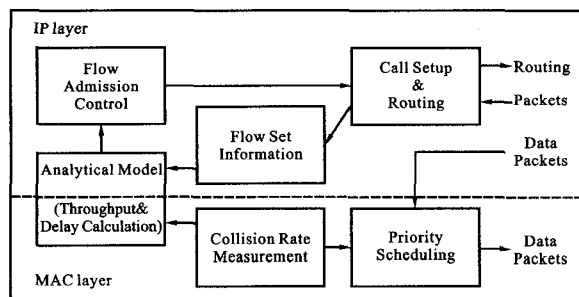


图 2 QoS 模型的 IP 和 MAC 层

图 2 中, 分析模块根据流设置信息和冲突速率信息, 在 MAC 层为调度提供了吞吐量和时延信息, 在网络层和路由协议结合起来为实时数据流提供一个高质量的传输路径. 一个新的呼叫到来后, 若最终接纳控制模块允许该数据流进入网络, 在完成传输

路径的建立后, 最终由 MAC 层的优先级调度模块根据优先级对数据包进行传输.

3.2 QoS 跨层设计方法

跨层设计可以在任意两层或多层之间实现, 包括自底向上、自顶向下、以某一层为中心以及这些方法的综合运用等.

3.2.1 传输层和网络层结合

如前所述, 无线 Mesh 网中对实时多媒体数据上采用多径传输是一种有效的方法. 文献[12]基于多路径传输提出了 AMTP 协议 (Ad hoc Multipath Treaming Protocol). 该协议通过中间路由的传输层和网络层跨层进行信息传递, 获取路由和链路状态信息, 对造成数据包丢失的原因进行区分, 并采取不同措施. 由于无线信道的差错造成丢包, 就尽可能快的进行重传并提高差错控制; 由于网络拥塞造成丢包时, 就降低发送速率; 由于路由的变化或中断而引起时, 就停止发送直到新的路径重新建立.

Sastry Kompella 等人针对提高 Mesh 网并发视频流传输质量问题进行研究. 将降低应用层的视频失真率作为优化目标, 把路径选择和速率分配问题相结合作为优化手段, 提出了解决方法, 并证明了该方法在理论上的最优性.

3.2.2 网络层和 MAC 层结合

Haitao Wu 等人对多天线多信道无线多跳网的 2.5 层即 MAC 层和网络层中间, 提出了方案 JCAR (Joint Channel Assignment and Routing), 将路由选择和信道分配结合起来进行协调. 针对无线网络信号易受干扰的问题, 首先讨论了信道分配和路由选择二者之间的关系, 指出若二者之中任一方固定, 单方面改变另一方并不能提高性能, 只有相互结合才能达到优化性能的目的. 接着定义了信道耗费判据 CCM (Channel Cost Metric), 其是指节点的期望传输时间与信道利用率之积, 并在整个信道上的求和, CCM 可以较为真实的反映由于干扰而带来的信道消耗. 在此基础上, 设计了一个分布式算法, 可以有有效的选择 JCAR 的运行模式, 达到最小的 CCM 值. 其结构图如图 3 所示.

为了提高 Mesh 网络端到端的吞吐量, 文献[13]将多路径路由和多信道链路相结合, 提出了 JMM (Joint Multi-channel and Multi-path control) 协议. JMM 通过时间片来协调对信道的利用, 设置了双重路径对网络数据流进行传输, 同时在路由发现阶段, 提出了一个 GREQ (Gateway REQuest) 前向策略来降低广播的开销. 实验表明 JMM 能够有效的

在不同的信道、时间片以及路径上对竞争数据流进行分解,从而极大的提高了网络吞吐量。

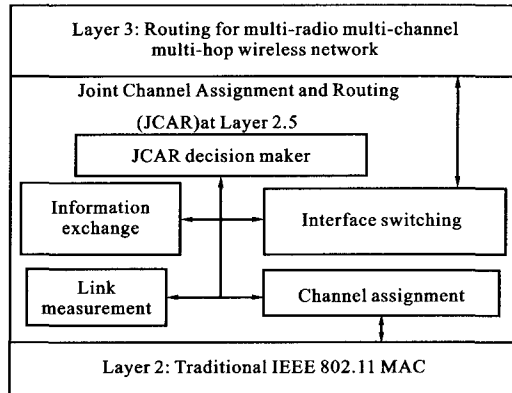


图3 JCAR 跨层设计

3.2.3 多协议层之间的结合

设计网络协议栈时,为了在跨层设计带来的复杂性和网络性能提升之间达到一个平衡,在文献[14]中,在尽量保持各层之间相对独立的基础上,强调了相邻层之间交互的参数。自适应的链路层可以根据信道状况来调节数据包的大小和发送速率等参数;在 MAC 层和网络层将容量分配和流优化结合起来从而可以大幅度的提高端到端的视频质量。其

体系结构如图4所示。

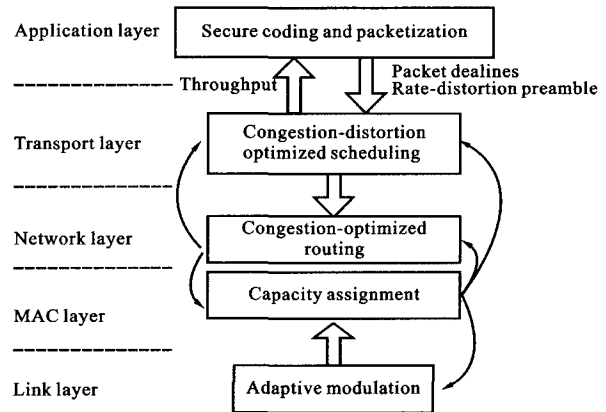


图4 多层结合跨层设计

为使得多信道无线 Mesh 网吞吐量的最大化并保证一定的公平性,文献[15]将传输层、网络层、MAC 层和物理层这四层结合起来进行跨层设计,把速率分配、路由、信道分配以及能量控制等综合起来,进而达到全局的最优。在文献[16]中,为尽可能的提高延迟敏感视频流的服务质量,提出了一个包括应用层、网络层、MAC 层和物理层的跨层方案,并涉及端到端传输和各个相关节点的综合优化算法。几种跨层设计方案的对比如表4所示。

表4 跨层设计方案对比

文献	跨层方案	QoS 保障	实现难易度
[12]	传输层 + 网络层	Throughput	简单
[13]	网络层 + MAC 层	Throughput, Channel Utilization	简单
[14]	传输层 + 网络层 + MAC 层	Throughput, Delay, PSNR	较复杂
[15]	传输层 + 网络层 + MAC 层 + 物理层	Throughput, Fairness	较复杂
[16]	应用层 + 网络层 + MAC 层 + 物理层	Packet Loss, Channel Utilization, PSNR	较复杂

4 结束语

文中从分层、跨层两个方面分析总结了无线 Mesh 网络对 QoS 的支持。已有的研究已经取得了一定的成果,但在以下方面还需要做进一步的研究:(1)节点的移动性考虑。(2)网络资源的占用和 QoS 保障之间的平衡。(3)Mesh 网终端节点的多样性考虑。(4)Mesh 网节点间协作提高网络 QoS。(5)在真实网络场景下,对跨层设计方法进行验证。

参考文献:

[1] Akyildiz Ian F, Wang Xudong, Wang Weilin. Wireless mesh networks; a survey[J]. Computer Networks, 2005 (47):445 - 487.

[2] Waharte Sonia, Boutaba Raouf, Iraqi Youssef, et al. Routing protocols in wireless mesh networks: challenges, and design considerations[J]. Multimedia Tools and Applications, 2006(29):285 - 303.

[3] Sarma Nityananda, Singh Aditya, Nandi Sukumar. A strict priority based QoS-aware MAC protocol for mobile Ad Hoc networks[C]// LNCS 5375: Proc of the 5th Int Conf on Distributed Computing and Internet Technology. Berlin: Springer, 2008:121 - 132.

[4] Sheu Jangping, Liu Chihsun, Wu Shihlin, et al. A priority mac protocol to support real-time traffic in Ad Hoc networks[J]. Wireless Networks, 2004, 10(1):61 - 69.

[5] You Tiantong, Hassanein Hossam, Yeh Chihsiang. Controllable fair QoS-based MAC protocols for Ad Hoc wireless networks[C] //Proc of the Int Conf on Parallel Pro-

- cessing Workshops. Los Alamitos, CA: IEEE, 2004.
- [6] Berqia Amine, Angoma Blaise, Mikou Noufissa, et al. Fairness and QoS in Ad-Hoc networks [C] //Proc of IEEE Vehicular Technology Conf. Singapore: IEEE, 2008.
- [7] Qiu Jigang, Fan Guangbin, Long Yi, et al. A multi-channel protocol with QoS provision in Ad Hoc network [C]// SPIE 6354: Conf on Network Architectures, Management, and Applications IV. Bellingham WA: SPIE, 2006: 63541Z-1-63541Z-8.
- [8] Kuang Tianbo, Williamson Carey. A bidirectional multi-channel MAC protocol for improving TCP performance on multihop wireless Ad Hoc networks[C]// Proc of the 7th ACM Int Symp on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Italy: Venezia, ACM, 2004.
- [9] 杨超, 张红斌, 杨卫东, 等. 一种新的无线 Mesh 网路由协议[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(3):882-887.
- [10] Anand Prabhu Subramanian, Milind M Buddhikot, Scott Miller. Interference aware routing in multi-radio wireless mesh networks[C]// Proc of the 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks. Reston, Virginia: IEEE, 2006.
- [11] Rangwala Sumit, Jindal Apoorva, Jang Ki-Young, et al. Understanding congestion control in multi-hop wireless mesh networks [C]// Proc of MobiCom'08. San Francisco, California: ACM, 2008.
- [12] Rojviboonchai Kultida, Yang Fan, Zhang Qian, et al. AMTP: a multipath multimedia streaming protocol for mobile Ad Hoc networks[C]// Proc of the 40th IEEE Int Conf on Communications. Seoul, Korea: IEEE, 2005.
- [13] Tam Waihong, Tseng Yuchee. Joint multi-channel link layer and multi-path routing design for wireless mesh networks[C]// Proc of INFOCOM'07. Anchorage, Alaska: IEEE, 2007.
- [14] Setton Eric, Yoo Taesang, Zhu Xiaoping, et al. Cross-layer design of Ad Hoc networks for real-time video streaming[J]. IEEE Wireless Communications, 2005(8): 59-65.
- [15] Tang Jian, Xue Guoliang, Zhang Weiyi. Cross-layer optimization for end-to-end rate allocation in multi-radio wireless mesh networks [J]. Wireless Networks, 2009 (15):53-64.
- [16] Andreopoulos Yiannis, Mastronarde Nicholas, Schaar Michaela van der. Cross-layer optimized video streaming over wireless multihop mesh networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(11):2104-2115.

作者简介:

崔华力 男,(1978-),博士研究生.研究方向为无线 Mesh 网络、QoS、网络测量.

钱德沛 男,(1952-),教授,博士生导师,CCF 高级会员.研究方向为高性能计算机、网络技术、计算网络管理、性能测量、无线传感器网络.

刘 轶 男,(1968-),博士,教授.研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统.

伍卫国 男,(1964-),博士,教授,博士生导师.研究方向为计算机体系结构、嵌入式系统.

彭 绯 女,(1975-),博士,副教授.研究方向为无线传感器网络.

(上接第 172 页)

- [6] 刘强,薛惠锋.基于多 Agent 的指控系统防空作战效能评估仿真研究[J].微电子学与计算机,2008,25(2):126-128.
- [7] 贺升平,覃征.一种新的机动目标功能合群算法[J].微

电子学与计算机,2006,23(6):16-17.

作者简介:

贺升平 男,(1968-),博士,高级工程师.研究方向为规划识别技术和软件工程.