

基于 802.11 的无线 Mesh 网络可用 带宽估计方法

陈 阳, 李陶深, 葛志辉

(广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 可用带宽估计方法是提高网络 QoS 水平的关键技术。通过分析无线 Mesh 网络的特点与无线信号通信的特征, 并建立信号信道容量与发送功率和接收功率在理想通信系统中的数量关系, 建立了可用带宽与发送功率和接收功率的数量关系, 提出了通过计算无线 Mesh 网络节点信号容量来估计无线 Mesh 网络链路可用带宽的方法, 从而使得可用带宽估计方法在无线 Mesh 网络的估计结果更接近真实值。实验结果表明, 该方法估计的结果更接近真实的可用带宽, 在无线 Mesh 网络中的精确度要高于 APEAB 方法, 可以为网络管理、流量控制和保证 QoS 提供参考。

关键词: 无线 Mesh 网络; 可用带宽; 被动估计; 信道容量

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)11-0096-04

A Method of Available Bandwidth Estimates for Wireless Mesh Network Based on 802.11

CHEN Yang, LI Tao-shen, GE Zhi-hui

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Available bandwidth estimation is one of the key technologies to enhance the network QoS level. An improved available bandwidth estimation method for wireless Mesh network is proposed. Firstly, the quantitative relation between signal channel capacity and sending/receiving power is determined by analyzing the features of wireless Mesh network. And then, the more accurate available bandwidth can be estimated based on the relation by calculating the size of signal node capacity within wireless Mesh network. Experimental results show that available bandwidth which proposed method estimates is closer to real usable value in wireless Mesh network, and its accuracy is better than APEB method. The estimated available bandwidth can provide the reference for network management, flow control and QoS guarantee.

Key words: WMN; available bandwidth; passive estimates; channel capacity

0 引 言

随着无线网络技术的高速发展, 无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Network, WMN) 在无线通信领域上备受瞩目。它是一种不需要固定网络基础设施的无中心结构的网络, 具有自配置、自组织、自管理、自动恢复、高容量、组网灵活、成本低廉等优点^[1]。WMN 网络是从 Ad-Hoc 网络中发展而来的, 与 Ad-Hoc 网络相比, 它有着更高的可靠性、更高的可用带宽, 能利用较小的发射功率获得更大的无线覆盖范围^[2]。此外, WMN 的网络结构灵活, 使它可以与多种网络结构相结合, 组

成含有 WMN 网络的无线网状网络, 可为网络用户提供更为方便的网络接入服务。

从现有的技术现状来看, 美国电气和电子工程师协会 (IEEE) 针对无线网状网络提出的 802.11s 标准草案在讨论中未达成一致, 目前大多数 WMN 网络还是使用 802.11 做为通信标准。802.11 的建立标准是基于单跳无线局域网, 这显然难以适应新型的 WMN, 特别是多跳无线 Mesh 网络。随着用户的增长和数据传输量的增加, 研究人员在优化 WMN 方面进行了大量的研究, 包括利用图论优化 WMN 拓扑结构和自适应载波门限控制输出功率等多种优化方案, 但目前 WMN 网络的 QoS 服务质量仍然难以得到保证, 还需要进一步进行研究工作。

提高 WMN 的网络的 QoS 服务质量就必须有一种合适的方法, 带宽估计方法是保证有线和无线网络一定 QoS 服务质量技术的关键部分, 因此 WMN 网络

收稿日期: 2011-04-10; 修回日期: 2011-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60963022); 广西自然科学基金项目 (桂科自 0991059); 广西大学拔尖创新团队建设计划项目 (L300249)

作者简介: 陈 阳 (1982-), 男, 硕士, 研究方向为信息安全。

需要一种合适的可用带宽估计方法,对网络的状态进行估计,这对于 WMN 网络的优化和服务质量保证都是必不可少的。目前可用带宽估计的方法主要有三种:即主动估计方法、数学模型方法和被动估计方法。在主动估计方法中,将探测数据包以不同的速率发送到目的节点,根据目的节点的数据包时延来估计可用带宽的大小^[3];或是发送不同间隔的探测数据包,通过反馈的时间间隔来估计可用带宽的大小^[4]。该算法需要增加额外的网络流量,占用较多的网络可用资源,会导致网络性能的下降。在数学模型估计算法中,相应的数学模型都可以在不增加额外网络流量的基础上,精确计算出网络可用带宽^[5],但是这类算法高度依赖网络拓扑结构,很难在现实的无线网络中使用,特别是移动性较强的无线网络。被动估计算法在一定时间内被动地监视通信信道的利用率和数据包的丢失率,然后根据监测的结果,判断现有网络可用带宽。这种方法是通过 Mac 层提供的数据来实现的,不会增加额外的网络流量^[6]。

在总结前人研究成果的基础上提出了一种 APE-AB 方法^[7],之前的研究已经从 Mac 层中监听了 DIFS、退避时间、碰撞率、ACK 以及 SIFS 这些网络状态信息,在此基础上,作者考虑了隐藏节点和暴露节点的问题,在算法中引入了 RTS/CTS 时隙,使得估计算法精确度得到进一步提高,然后将数据传输所需要的耗时与测试时间的比值乘以一个理想情况下的最大信道容量来估计出可用带宽。

在传统的无线网络中,节点移动性较强,难以分析通信过程所产生的变化^[8]。在 WMN 网络中,骨干节点位置相对稳定,不需要经常移动,这些节点的信号衰落不像移动节点这么毫无规律,而传统的带宽估计方法无法体现通信过程的变化,难以精确估计 WMN 骨干节点的链路可用带宽;在 WMN 的部分移动节点中,多数属于终端用户,非骨干节点的主要类型是笔记本电脑、其他类型网络的接口、掌上电脑等^[9],这些节点具有移动性,但是在实际的 WMN 运行中,信号到达目的节点时,信号强度会受到多种因素的衰减,所以目的节点无法获得理想的信道容量,随着 802.11 协议的不断研究和改进,这种通信的变化也可以被考虑。如果仍沿用传统估计方法,使用理想的信道容量数值,就会使带宽估计的结果与实际带宽出现偏差。而网络优化方法的效果很大程度上要依靠系统获取可用带宽信息的能力,如信道分配策略^[10]与拥塞控制算法^[11]。

为了解决以上问题,文中着重研究的是 WMN 网络中节点信道容量的问题,并设计一种有效的无线 Mesh 网络可用带宽被动估计方法。

1 WMN 网络可用带宽估计方法改进

在阐述算法之前,首先需要了解 WMN 网络的信道容量。在 WMN 网络中,给定信道从源发送信息的度量,在适当编码方案下,差错率是指在可接受范围内所能达到的最大比特率。根据信道容量定理可以知道信道容量的计算公式^[12]:

$$C = B \times \log_2(1 + S/N) \quad (1)$$

其中, B 是信道带宽, S/N 是噪音比。由以上公式可知,信道容量与信道带宽和信噪比相关。信道带宽是信道能通过的最高频率和最低频率的差,在制成信道电路的时候,信道带宽就已经决定了。噪音比则与天线的位置、网络环境的复杂程度、网络的拓扑结构有关,不同位置、不同型号的路由器,其噪音比也是不同的,因此信道容量也一直在不断变化。因此,可以根据具体网络的环境和节点的分布规律来选择适合的噪音比。文中以自然环境为研究环境,自然界的噪声即高斯噪声,服从正态分布。在理想的通信系统中,调制解调信号前后信息传输率不变,无线信号首先经过调制器调制成稳定的高频射频振荡信号,可以设信号调制前信道容量为 C_s ,调制前后信息传输率为 B_0 ,发射功率为 F_s ,在传输到达目的节点的过程中被加入了一个高斯噪声 N_s ,信号解调前后的信息传输率为 B ,解调后的功率为 F_R ,信道容量为 C 。在图 1 的理想通信系统中, $C_s = C$, $B_0 = B$, 根据信道容量定理可以得出调制前传输速率:

$$B = \frac{C_s}{\log_2(1 + F_s/N_s)} \quad (2)$$



图 1 理想通信系统

同理,设信号调节后的功率为 F_R ,信道容量为 C ,接收噪音公里处为 N_R ,可以得出解调前传输速率:

$$B = \frac{C}{\log_2(1 + F_R/N_R)} \quad (3)$$

根据式(2)和(3)可以推出:

$$C = \frac{C_s \log_2(1 + F_R/N_R)}{\log_2(1 + F_s/N_s)} \quad (4)$$

上述的 C 就是目的节点的信号容量。在发射信号一定的情况下, C_s 是不变的,此时目的节点的信号容量只与源节点的发射功率、噪音功率和目的节点的接收功率还有环境噪音功率相关。由于噪声功率的波动很难实时测试,在自然环境下,只要发射功率和接收功率足够大,噪声功率的影响是有限的,目的节点的信号容量主要受发射功率和接收功率的影响。信道容量与接收功率之间是线性关系,随着接收功率的增加,信道

容量单调增加,并渐进趋向于极限:

$$C_{\infty} = \frac{F_R}{N_R} \log_2 e \quad (5)$$

在无线通信过程中,移动无线信号的强度受到时间和频率变化的影响,其变化主要有两个类型:大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落是由距离变化产生的路径损耗和各种大型障碍物产生的阴影造成的;而小尺度衰落是由发射端与接收端之间的多条信号路径相互干扰所产生的。在自然空间下,移动节点的接收信号会发生多径效应和多普勒频移,多普勒频移的最大差是:

$$D_{\max} = \max f_c | \tau_i(t) - \tau_j(t) | \quad (6)$$

其中 $\tau_i(t)$ 是出现最大相位变化的第 i 条路径的时延, $\tau_j(t)$ 是出现最小相位变化的第 j 条路径的时延, f_c 是载波频率。根据(6)可以计算出无线信道相干时间 T_c :

$$T_c = \frac{1}{4D_{\max}} \quad (7)$$

根据式(7)可以判断,当相干时间 T_c 远小于需求的时延,称为快衰落阶段,当相干时间 T_c 远大于需求时延,称为慢衰落阶段。信道处于快衰落还是慢衰落阶段与周围的环境、用户的要求等因素有关,比如多媒体传输用户的要求通常比文字传输用户的要求高一些。可以根据不同网络环境计算出快衰落偏差 X_{α} 和慢衰落偏差 X_{β} , 为了便于研究,文中将这两个影响因素设定为固定值。在不同的环境下,可以选择一个适当的参考距离 d_0 , 计算出路径增益 β 。则距离为 d 的节点路径损耗为:

$$L_p = \beta + 10n\lg(d/d_0) \quad (8)$$

其中, n 是不同环境下的路径增益指数。由此可以计算出不同环境下的路径损耗。在自由空间里,距离为 d 的功率损耗 P_L 是

$$P_L = L_p + X_{\alpha} + X_{\beta} \quad (9)$$

距离为 d 的接收功率 F_R 是:

$$F_R = F_S - (L_p + X_{\alpha} + X_{\beta}) \quad (10)$$

也就是:

$$F_R = F_S - (\beta + 10n\lg(d/d_0) + X_{\alpha} + X_{\beta}) \quad (11)$$

由于文中研究是在自由空间中,所以目的节点接收功率 F_R 可以表示为:

$$F_R = F_S - (32.44 + 20\lg f + 20\lg d + X_{\alpha} + X_{\beta}) \quad (12)$$

其中 f 是电磁波的频率,由此,可以根据不同的传播环境,计算出目的节点的接收功率。

该计算公式需要用到源节点与目的节点之间的距离,而 WMN 网络中的骨干节点相对静止,因此可以在 WMN 骨干节点中建立一个备用数据表,见表 1。

表 1 骨干节点备用数据表

相邻骨干节点 Mac 地址	与相邻骨干节点的距离
n_1	d_1
n_2	d_2
n_3	d_3

在优化 WMN 骨干节点的拓扑后,每个骨干节点的邻节点数量不多,因此备用表不会消耗大量的存储空间,也不会因为消耗太多 Mac 层资源造成 Mac 层拥塞。在接收到目的节点的 RTS 帧中获取目的节点的 Mac 地址,然后在备用表中进行查找,获取两个骨干节点之间的传输距离,利用(12)式可以计算出目的节点的接收功率。

由于 802.11s 标准没有达成一致,目前 WMN 使用的各种改进协议很多,由 802.11DCF 机制改进而来的各种控制发射功率优化 WMN 的协议被都用于 WMN,难以对发射功率控制的方法进行统一。为了便于分析,文中统一设定 WMN 各个节点的发射功率是固定不变的,使用 802.11 做为 WMN 的通信协议,对 WMN 网络进行可用带宽进行估计。这与使用 802.11 改进协议和 802.11s 草案的 WMN 可用带宽估计方法类似,协议的改进会增加网络状态的信息,同样可以获取发射功率或类似的网络状态信息。因此,在噪音功率不变、载波侦听门限不变等理想环境下,移动节点的发射功率与要通信的骨干节点发射功率相等,在源节点可以获取目的节点发送的 RTS 信号功率 F_{RTS}^R , 在自由空间理想通信系统中,目的节点的接收功率 $F_R = F_{RTS}^R$ 。因此目的节点的接收功率可以表示为:

$$F_R = \begin{cases} F_S - (32.44 + 20\lg f + 20\lg d + X_{\alpha} + X_{\beta}), & \text{找到备用表查找成功} \\ F_{RTS}^R, & \text{没找到备用表或查找不成功} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入(4)式可以计算出目的节点接收信号的信道容量 C 。根据文献[6]中的算法:

$$AB_{ABE} = (1 - \frac{DIFS + backoff}{T}) \times (1 - P_c) \times (1 -$$

$$R/C) \times (1 - ACK) \times \frac{T_i}{T} \times C \quad (14)$$

其中:

AB_{ABE} 是可用带宽;

数据碰撞率 $P_c = \frac{f_{-h}}{C - f_{-h}}$ (f_{-h} 是总碰撞数据大小,

C 是总数据量);

$$R/C = \frac{(RTS + CTS) + 2 \times SIFS}{T};$$

$$ACK = \frac{T_{ACK} + SIFS}{T};$$

T_i 为信道测试时的空闲时间。

最后,将计算出来的目的节点信道容量 C 代入(14)式,就可以估计出 WMN 网络各链路之间可用带宽的大小。

2 仿真实验与结果分析

NS2 (Network Simulator-Version 2, 简称 NS2) 是由 UC Berkeley 设计,起初由 VINT Project 团队维护的一套开放源代码网络仿真软件。文中使用 NS-2 进行网络环境的模拟仿真^[13]。在 NS-2 中,建立了一个由 5 个节点组成的 Mesh 网络,其中 4 个静态节点和 1 个移动节点,4 个静态节点均匀分布在 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 范围内,移动节点的移动范围在静态节点的覆盖范围内,采用 802.11 做为通信协议, AODV 做为路由协议,其他参数如下: DIFS = $50\mu\text{s}$, SIFS = $20\mu\text{s}$, Slot Time 为 $20\mu\text{s}$, C_s 为 2M, F_s 为 38dbm, β 为 18dbm, X_a 和 X_p 均为 2dbm, d_0 为 100m, N_s 和 N_R 均为 1dbm。

为了对 MPEAB 方法进行模拟和分析,仿真实验搭建的实验平台如下,4 个静态节点之间保持一定的距离保持不变,即 4 个骨干节点,将移动节点与静态节点的链接距离设置得足够远,匀速通过 2 个静态节点的通信范围,其中这两个静态节点都不是网关,通过 MPEAB 方法分别对两个静态骨干节点与移动节点和骨干节点之间的链路进行可用带宽估计。仿真实验结果如图 2 所示,从实验结果可以看出,APBE 算法的估计值稍微偏高,而文中方法的估计结果更接近实际传输率。实验结果见图 2、图 3。图 2 是移动节点与骨干节点通信链路的可用带宽在不同负载下的变化过程,由图 2 可以看出 MPEAB 方法对移动节点的可用带宽估计精确度比较高,当移动节点距离骨干节点较远时,与 APEAB 方法相比,估计结果偏差减少;图 3 是两个骨干节点之间的通信链路可用带宽在不同负载的变化过程,由于骨干节点相对静止,估计结果的波动较小,由图 3 可见, MPEAB 方法更接近真实值。

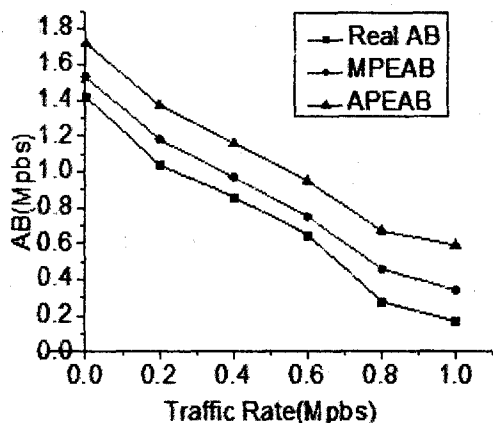


图2 相邻骨干节点的可用带宽和负载比较

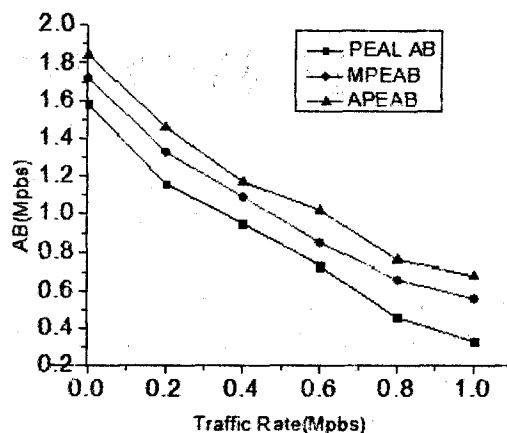


图3 移动节点与骨干节点的可用带宽和负载比较

3 结束语

针对现有的可用带宽估计方法忽略了信道容量理想化问题,提出了一种改进的在 802.11 WMN 可用带宽被动估计方法。该方法考虑了 DIFS 和退避时间、数据包碰撞概率、信道测试的空闲时间、RTS/CTS 的发送时间,以及无线信号在传输过程中信号变化产生的信道容量变化。所用的参数可以在无线 Mesh 网络源节点中获取,不需要消耗额外的网络资源。模拟仿真实验结果说明, MPEAB 的精确度要高于 APEAB,可以为现阶段使用 802.11 及其改进协议的 WMN 网络管理、流量控制和保证 QoS 提供参考。

参考文献:

- [1] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [2] 沈庆伟. 无线 Mesh 网络的分析与研究[J]. 安徽工业学院学报, 2009, 17(6): 90-95.
- [3] Riberio V J, Riedi R H, Baraniuk R G, et al. pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths [C]//Proceedings of Passive and Active Measurements (PAM) Workshop. La Jolla, CA: [s. n.], 2003: 68-73.
- [4] Jain M, Dovrolis C. Pathload: a measurement tool for end-to-end available bandwidth [C]//Proceedings of Passive and Active Measurements (PAM) Workshop. Fort Collins, Colorado USA: [s. n.], 2002: 14-24.
- [5] Wu D, Negi R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 630-643.
- [6] Tursunova S, Inoyatov K, Kim Y T. Cognitive Passive Estimation of Available Bandwidth (cPEAB) in Overlapped IEEE 802.11 WiFi WLANs [C]//IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. Osaka International Convention Center, Osaka, Japan: [s. n.], 2010: 448-454.
- [7] Park H J, Roh B H. Accurate Passive Bandwidth Estimation

(下转第 104 页)

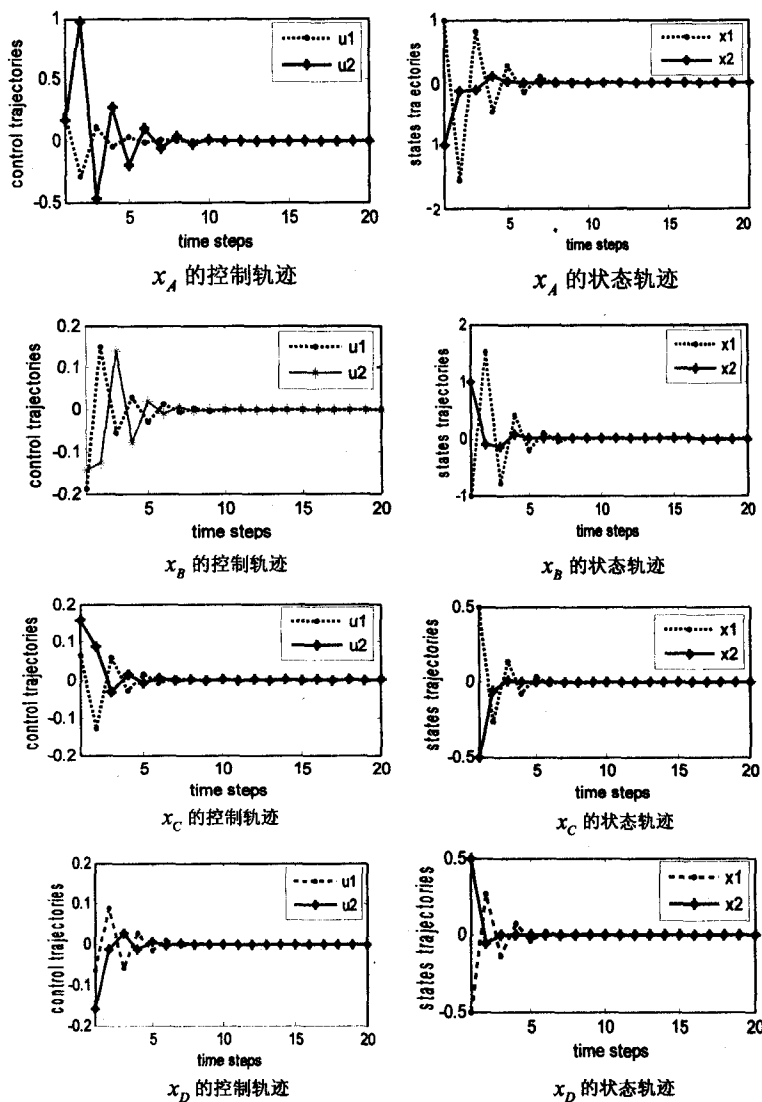


图 6 控制轨迹和状态轨迹

网络近似非线性函数,得到代价函数和最优控制律的近似,实现对离散非线性系统优化控制,实验仿真验证了该算法的有效性。

参考文献:

- [1] Werbos P J. Approximate dynamic programming for real control and neural modeling [M]//Handbook of Intelligent Control: Neural Fuzzy, and Adaptive Approaches. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [2] Al-Tamimi A, Lewis F L, Abu-Khalaf M. Discrete-time nonlinear HJB solution using approximate dynamic programming: convergence proof [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(4): 943-949.
- [3] Liu D, Xiong X, Zhang Y. Action-dependent adaptive critic designs [C]//Proceedings of the INNS-IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Washington, DC: [s. n.], 2001: 990-995.
- [4] Murray J J, Cox C J, Lendaris G G, et al. Adaptive dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2002, 32(2): 140-153.
- [5] Wang Feiyue, Jin Ning, Liu Derong, et al. Adaptive dynamic programming for finite-horizon optimal control of discrete-time nonlinear systems with ε -error bound [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(1): 24-36.
- [6] 韩力群. 人工神经网络教程 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [7] 王蓓, 刘桥. 优化 BP 神经网络的可靠性预测模型 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(9): 102-105.
- [8] 洪素惠, 吴发成, 米红. 神经网络自适应 PID 在吹瓶机中的应用 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 177-180.
- [9] 王忠, 孙钰. 基于神经网络的自适应彩色图像盲水印算法 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(12): 108-113.
- [10] 梁久祯, 何新贵, 周家庆. 神经网络 BP 学习算法动力学分析 [J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 729-735.
- [11] 胡寿松, 王执铨, 胡维礼. 最优控制理论与系统 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] Abu-Khalaf M, Lewis F L. Nearly optimal control laws for nonlinear systems with saturating actuators using a neural network HJB approach [J]. Automatica, 2005, 41(5): 779-791.
- [10] 葛志辉, 李陶深, 张继成. 无线 Mesh 网络逐层信道分配策略研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2010, 35(6): 13-17.
- [11] 李陶深, 韦燕霞, 葛志辉. 基于跨层负载感知的无线 mesh 网络拥塞控制算法 [J]. 北京邮电大学学报 (自然科学版), 2011, 34(1): 50-54.
- [12] 郝建民. 信道带宽与功率互换原理在扩频体制中不成立 [J]. 遥测遥控, 1997, 19(4): 57-60.
- [13] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络仿真 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

(上接第 99 页)

(APBE) in IEEE 802.11 Wireless LANs [C]//Ubiquitous Information Technologies and Applications (CUTE). International Conference Center, Sany, Hainan: [s. n.], 2010: 1-11.

- [8] Oyman, Paulraj A J. Power-Bandwidth Tradeoff in Dense Multi-Antenna Relay Networks [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2007, 6(7): 2282-2293.
- [9] Rodas J, Escudero C J. Dynamic path-loss estimation using a particle filter [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2010, 7(4): 1-5.