

Ad Hoc 无线网络跨层设计综述^{*}

卢先领^{1,2} 孙亚民¹ 周 灵¹ 于继民¹

(南京理工大学计算机科学与技术系 南京 210094)¹ (江南大学控制工程中心 无锡 214112)²

摘 要 为了进一步适应 Ad hoc 无线网络环境下各种应用的需要,提高网络性能,Ad hoc 无线网络的跨层设计已成为目前国内外网络研究的热点和难点问题之一。给出了 Ad hoc 无线网络跨层设计的定义,分析了跨层设计的原因、优势和主要技术;对跨层设计的方法进行了分类,主要包括四种方法:层间传递相关信息,联合优化网络相关层,融合相邻层,分层作为网络最优化分解,并对它们进行了分析比较和评价;最后探讨了 Ad hoc 无线网络跨层设计面临的挑战和今后的研究方向。

关键词 Ad hoc 无线网络,跨层设计,松散耦合设计,最优化分解

A Survey of Cross Layer Design for Ad Hoc Wireless Networks

LU Xian-Ling^{1,2} SUN Ya-Ming¹ ZHOU Ling¹ YU Ji-Ming¹

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)¹

(Control Science and Engineer Research Central, Southern Yangtze University, Wuxi 214122)²

Abstract In order to accelerate the development of various applications and high-performances in Ad hoc wireless networks, cross layer design has been discussed and is becoming an important and difficult research problem for Ad hoc wireless network. First cross layer design is defined, the motivations and the advantages of cross layer design are analyzed in the paper. Secondly, all important approaches of cross layer design are depicted and discussed according to different categories: passing information across layers, joint design cooperated layers, merging adjacent layers and layering as optimization decomposition. At the same time the paper evaluates and compares them with performance and complexity. At last the challenges of cross layer design are discussed and the future research work is proposed.

Keywords Ad hoc wireless network, Cross layer design, Loose coupled design, Optimization decomposition

1 引言

随着 Internet、无线通信技术的发展,Ad hoc 无线网络技术越来越受到人们的重视。Ad hoc 无线网络是由众多的无线移动节点组成,这些节点不需要无线网络基础设施的支持,自发地以多跳的方式快速地建立通信联系,组织成为一个临时的网络。在 Ad hoc 无线网络中,节点间相互协作,采用分布式算法控制网络行为,共同完成任务^[1,2]。

TCP/IP 体系结构在传统的有线网络中取得了巨大的成功,成为事实上的网络标准。为了与现有的网络互联互通,Ad hoc 无线网络也采用的是 TCP/IP 体系结构,然而,Ad hoc 无线网络自身的特性如无中心控制节点、节点的移动导致串路和拓扑快速变化、节点资源和网络带宽受限等问题严重影响了 Ad hoc 无线网络的性能^[3],决定了 Ad hoc 无线网络不能完全照搬使用现有网络的协议栈,实践证明,跨层设计是提高 Ad hoc 无线网络性能最行之有效的方—^[4~7]。

本文首先给出了跨层设计的定义,分析了跨层设计的原因、优势和采用的主要技术;接着对现有跨层设计方法进行了分类、分析比较和评价;最后探讨了跨层设计面临的挑战和今后的研究方向。

2 跨层设计的概念

2.1 跨层设计的定义

分层协议栈结构是网络设计中最基础最有影响力的结构,协议栈中各层隐藏该层及其以下层次的复杂性,为上层提供服务^[8],分层结构逻辑清晰,扩展性强,鲁棒性高,便于实现。然而,在严格分层协议栈网络中,整个网络系统被分割成若干个独立的层(模块),相邻层与层之间的交互严格地通过层间的静态接口来实现,非相邻层之间不允许直接交互,因此,层与层之间的信息难以共享,增加了信息的冗余以及对等层间的通信开销^[9]。网络优化过程中各层只利用本层次的状态信息反复进行控制调整,忽视了层与层之间的协调合作,这对网络全局优化产生了不利的影响。

目前,对 Ad hoc 无线网络提出跨层设计主张的文献有很多,但对跨层设计还没有一个明确的定义。通俗地讲,Ad hoc 无线网络跨层设计是为了获得较高的网络性能(如高吞吐量、低延迟等),在全面综合考虑协议栈各层次之间的相互关系并保留原有分层协议栈结构的基础上,打破严格的层与层之间的通信限制,允许协议栈各个层次、各个模块间“直接”交互信息,为网络运行提供必要的 QoS 保障。与传统网络不同,Ad hoc 无线网络串路带宽有限且节点由电池供电,能量受限,合理分配有限的网络资源,节省能量消耗,延长网络生命周期是 Ad hoc 无线网络首要解决的问题;而无线网络在数据传输状态下节点的能量消耗最大,Ad hoc 无线网络跨层设计主要目的是通过增加本地节点层与层之间的直接交互,使得本地信息得以有效的共享从而减少不同节点对等层之间的通信及信

^{*} 本文受江南大学青年学术基金资助。卢先领 博士生,讲师,主要研究领域为无线自组织网络、传感器网络、计算机网络通信与优化;孙亚民 教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络通信,网络算法与协议;周 灵 博士生,讲师;于继民 博士生,讲师。

号处理开销^[9],满足 Ad hoc 无线网络全局优化的需要。在跨层设计中需要强调的是:

- Ad hoc 无线网络跨层设计并不是完全摒弃传统的分层协议栈结构,而是在保持分层协议栈的优点的前提下,增加不同协议层之间的直接交互,提高信息共享度和控制的灵活性。

- 在 Ad hoc 无线网络设计中,将整个分层协议栈一同进行跨层设计过于复杂,难以实现,科学有效的做法是根据 Ad hoc 无线网络应用 QoS 的约束条件,策略地选择若干层次进行跨层设计。

2.2 Ad hoc 无线网络跨层设计的原因

与 Internet 不同,传统的分层协议栈显然无法适应 Ad hoc 无线网络运行的需要。Ad hoc 无线网络以下的特点决定了其需要通过协议栈跨层设计来提高网络性能。

1. 无线信道是复杂的广播媒体,信道的带宽受限。隐藏和暴露终端是无线多跳网络中特有的问题,如何解决多个用户高效、合理地共享有限的无线信道资源,减少和避免数据分组的冲突是提高 Ad hoc 无线网络性能的关键技术之一。

2. Ad hoc 无线网络无中心控制节点,节点的能力(资源)有限,节点间需要相互合作才能完成任务,并且节点自身在终端和路由器两种角色中不断转换。传统的集中控制模式显然无法适应该网络的需求,而分布式控制增加了网络的复杂性和节点的处理负担,Ad hoc 无线网络必须采用特殊的方法减少节点资源的消费,适应网络控制算法的复杂性。同时,网络中节点间相互协作也需要应用跨层设计技术提高效率^[4]。

3. 周围环境的变化、节点的移动,使得无线信道质量随时间变化不断变化。一方面,由于信号的衰减,多径干扰和多普勒效应等,无线信道质量在短时间粒度内由“好”、“差”之间不断转换,另一方面,由于节点位置的变化、信号间的相互干扰等级的变化,无线信道质量在长时间粒度内不断波动。由此引发了节点接入、通信时间的波动。

4. 网络中的节点位置变化、信道条件的动态变化导致网络的拓扑发生变化。网络拓扑的变化直接影响节点发射、接收功率的调整和路由的变化。

5. Ad hoc 网络中移动节点的能量高效问题、安全问题非常突出。网络的的能量管理和安全管理无法由某一层单独来实现,需要整个协议栈中不同的层协作来完成。

传统网络中,协议栈各层关系密切,耦合性较强,比如物理层与协议栈中的高层有着直接耦合关系。加强层与层之间的协作,互通层间的信息,适当修改传统分层网络信息交互规则,将对整个 Ad hoc 无线网络性能提高产生积极的影响。

2.3 跨层设计的优势

Ad hoc 无线网络中系统的动态性是网络设计的难题,跨层设计在增加系统灵活性的同时,可通过合理配置有限的系统资源,适应动态环境变化的需要,优化系统目标。Ad hoc 无线网络通过跨层设计将得到以下好处:

- 跨层设计在优化协议栈某一层功能的同时优化了整个网络的性能。

- 跨层设计提高了局部和全局的自适应能力。协议栈的自适应能根据本层参数的变化首先进行自适应补偿,当本层的自适应补偿无法满足该层动态变化的需要时,再通过各层之间交互信息来作出更有效的补偿^[3]。

- 跨层设计减少了网络中的冗余信息量,每层之间的信息都能被其他层所共享,各层无需备份相同的信息。

- 跨层设计提高网络各层对其他层内容的感知度,从而

使得各层协议能够在全局范围进行调整满足网络应用 QoS 的约束和底层网络环境。

2.4 跨层设计常用技术

目前,跨层设计中主要采用调度技术^[6,10,11]、多样性技术^[12~14]和自适应机制^[15,16]三种。调度技术主要包括节点接入调度、串路使用调度、网络应用调度、资源预留和数据传输优先级分配等技术,调度技术可以减少网络流量突发性的影响,使得系统更适应网络动态变化带来的挑战,满足网络应用的 QoS 约束条件。多样性技术包括串路特性多样性(如天线、编码和信道多样性)、路由选择多样性、应用需求多样性和接入技术多样性等,多样性可以增强系统应对无法预知的网络动态变化的能力。自适应机制包括数据串路层、网络层和应用层的自适应机制,自适应机制可有效地管理、配置有限的网络资源和节点资源,并协同多样性技术、调度技术补偿不同粒度的网络变化,提高系统的健壮性。

3 跨层设计的方法

学者们提出了许多不同的跨层设计方法来改善无线环境下传统分层协议栈无法克服的网络串路状态动态变化、网络和节点资源受限带来的不利影响。我们将这些方法分成以下四类:层间传递相关信息,联合优化网络相关层,融合相邻层,分层作为网络最优化分解。

3.1 层间传递相关信息

目前,跨层设计主要方法是在原有的协议栈的基础上,通过增加层间的接口实现不同层间的信息直接传递,提高不同层间信息交互的灵活性和协议执行的效率。例如:应用层将它可接受的丢包率信息传递给数据串路层,使得数据串路层调整纠错模式以适应应用层的需要。数据串路层将串路状态信息传给网络层,为网络层选择合适的路由提供支持。根据参数的传递方向可以将该方法细分为以下三种:

A) 信息下行

信息下行指的是在网络跨层设计中,网络节点高层的信息(如:QoS 约束信息)被直接传递到该节点的低层,网络低层接到高层的指示信息后调整自己的策略尽量满足高层的约束条件。文^[17]中网络的应用层将自己的延迟约束条件传递给串路层,这样串路层能根据应用层的延迟约束条件决定数据包的优先级。

B) 信息上行

信息上行指的是协议栈中低层的某些状态信息传给网络的高层,使得网络高层能根据低层传来的信息作出正确的决策,从而获得较好的性能。文^[18]为了解决 Ad hoc 无线网络的拥塞问题,设计了跨层拥塞避免模式 C³TCP,该模式将收集到的 MAC/PHY 层的容量信息如带宽、串路传输延迟等信息传递给传输层,传输层根据从网络低层获得的容量信息调整输出的数据流的大小,从而避免网络拥塞的发生。

C) 信息同时上行、下行

网络在运行时往往需要多层之间相互共享信息,因此在 Ad hoc 无线网络跨层设计中,将上层的信息传到下层的同时也需要将下层的信息传给上层。文^[16]为满足实时的视频流传输的需要,通过跨层设计,将网络层的负载信息传给传输层和数据串路层,与此同时将数据串路层的容量信息传给网络层和传输层。文^[19]为了获得较高的网络吞吐量,设计者让物理层、MAC 层和网络层相互交换各自所需的信息;物理层利用 MAC 层的信道资源预留信息和自身时变的信道信息不

断调整数据发送速率,与此同时,物理层将自身时变的信道信息传给 MAC 层,为 MAC 层调整资源预留提供依据,此外 MAC 层的信道自适应信息传给网络层,为网络层作出合适的路由选择提供决策依据。

参数传递是一种简洁有效的跨层设计方法,它可使得相

关层高效共享其所需信息,但增加了相关层与层之间的耦合性。其设计的关键是确定所需传递的信息参数,若参数选择不当,会引起不必要的信息交互和冗余。此外,信息在不同层之间的直接交互也可能导致信息传播的循环。表 1 给出了 Ad hoc 网络中各层之间主要的可用信息参数。

表 1 跨层设计中可供选择传递的参数

生产者/消费者	应用层	传输层	网络层	Link/MAC	物理层
应用层		丢包率 延迟、拥塞		串路状态 帧长 纠错模式	可用带宽
传输层	QoS 约束		移动 IP 地址	串路状态 帧长 纠错模式	BER, SINR
网络层	QoS 约束	RTT, RTO 信息		串路状态 帧长 RTS/CTS	容量信息
Link/MAC	QoS 约束 信号的编码	RTT, RTO 信息 丢包率 延迟、拥塞	QoS		BER, SINR
物理层	QoS 约束, 带宽			纠错模式 功率	

3.2 联合设计

Ad hoc 无线网络中,具有 QoS 约束的网络应用往往需要将协议栈中多层协议模块联合设计才能达到满意的效果。文[6]为了减少多用户接入时的冲突,增加单跳的吞吐量,节约有限的电池能量,将物理层的功率控制和 MAC 层的串路调度进行联合设计,取得满意的效果。文[20]将网络层、数据串路层和物理层联合设计,同时考虑功率控制、串路调度和路由选择,结果表明,使用该策略既获得较高的网络的性能,同时节约了网络能量的消耗,使得网络能量的消耗和网络的性能提高达到了平衡。

3.3 融合相邻层

Ad hoc 无线网络中某些相邻几层的联系非常紧密,信息交互频繁,因此将这几层进行“融合”,使得它们成为一个新的“虚拟协议层”。“融合”后而成的“虚拟协议层”在有效地保留了融合前各层功能的独立性的基础上,加强了内部协议模块之间的整合。在整个网络结构中“虚拟协议层”以新的协议层的形式使用下层服务,为上层提供服务,虚拟层所提供的服务与原有的服务相比更完善。该层与其相邻的上层及下层之间的界面和接口保持不变,这样既可以与原有网络互联,又可以提高协议运行效率。现有网络协议栈中,物理层与 MAC 层联系非常紧密,不少学者建议这两层进行融合设计,更有利于 Ad hoc 无线网络的优化^[5]。

3.4 分层作为网络最优化分解

网络是一个复杂的系统,现有的协议栈分层方法可以看作是综合协议栈中的各层协议,在网络上同步执行分布式计算来解决网络全局优化问题的连贯理论^[21,22]。换言之,Ad hoc 网络的分层协议栈是网络全局优化问题——网络效用最大化 NUM(Network Utility Maximization)的一种分布式解决方案。“分层作为网络最优化分解”的核心思想是:将整个网络看作一个系统优化器,终端用户的应用需求就是网络的优化目标,整个网络被建模为普通的 NUM 问题,从而将一个复杂的网络优化问题分解为若干简单的子问题。网络的每一层对应着分解的子问题,层与层之间的界面量化为对应的子问题中需要优化的基本变量和对偶变量的功能函数。不同的

分解方式,可以有着不同的分层结构,一般来说网络水平分解为分布式计算,垂直分解为拥塞控制,路由、调度、功率控制和编码等功能模块。这样我们可以通过设计不同的最优化分解方案比较目标函数值的大小,探究层与层之间的互相联系,以及层与层间的性能平衡,获得网络的设计目标的最优化。与此类似的 clean-slate 设计^[23]将分解的优化算法映射到网络的不同层:将拥塞控制算法映射到传输层,路由算法映射到网络层,调度和功率算法映射 MAC/PHY 层,并通过描绘不同层之间必要的交互信息来优化网络性能。“分层作为网络最优化的分解”具有统一的框架结构,是一种松散耦合的跨层设计方案。

3.5 比较

在分析了跨层设计的方法后,表 2 给出了上述四种方法的比较。

表 2 跨层设计方法综合比较

跨层设计方法 评价指标	层间传递参数	联合设计	融合相邻层	分层作为网络最优化分解
难易度	较易	较难	难	较易
层耦合度	较高	高	很高	低
可扩展性	好	较好	不好	好
统一框架	无	无	无	有

4 跨层设计的挑战和发展方向

尽管各种 Ad hoc 无线网络跨层设计方法取得了较好的效果,但是还是存在许多问题没有很好地解决,也给我们带来不少的挑战。

传统的分层协议栈结构严谨,每层都具有较高的独立性和鲁棒性。通过跨层设计增加层间交互的同时,也使得各个网络层的独立性和鲁棒性面临严重的挑战。文[24]指出,没有节制的跨层设计可导致“意大利面条式设计”——错综复杂,反而影响网络的效率,因为协议栈中的每一处微小的修改都会被传播到整个协议栈的每一层。此外,跨层设计还会导致协议栈中不同层与层协议间意想不到的交互,从而可能引

(下转第 32 页)

- 2 Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: Imelinsky T, Korth H, eds. *Mobile Computing*. Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1996. 153~181
- 3 Hong X, Gerla M, Pei G, et al. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In: *Proc. of ACM-IEEE MSWiM*, Seattle WA, 1999. 53~60
- 4 Perkins C, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers. In: *The ACM SIGCOMM Conf. on Communications Architectures*, London, 1994
- 5 Garcia-Luna-Aceves M S. An efficient routing protocol for wireless networks. *ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications (Special Issue on Routing in Mobile Communications Networks)*, 1996, 1 (2): 183~197
- 6 Pei G, Gerla M, Chen T W. Fisheye state routing: A routing scheme for ad hoc wireless networks. In: *The IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*, New Orleans, LA, 2000
- 7 Clausen T, Jacquet P, Laouiti A, et al. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. In: *IEEE INMIC*, Pakistan, 2001
- 8 Perkins C, Royer E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In: *Mobile Computing Systems and Applications*, 1999. *Proceedings. WMCSA'99. Second IEEE Workshop*, 1999. 90~100
- 9 Johnson D B, Maltz D A. *Dynamic source routing in ad hoc wireless networks*. In: *Mobile Computing*. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1996. 153~181
- 10 Park V D, Corson M S. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In: *The IEEE Conf. on Computer Communications (IN FOCOM)*, Kobe, 1997
- 11 蒋宗礼,姜守旭. *形式语言与自动机理论*. 北京: 清华大学出版社, 2003
- 12 Pearlman M R, Haas Z J. Determining the optimal configuration for the zone routing protocol. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Special Issue on Wireless Ad Hoc Networks)*, 1999, 17 (8): 1395~1414
- 13 Hass Z J. A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks. In: *IEEE Int'l Conf. on Universal Personal Communications (ICU PC'97)*, San Diego, 1997

(上接第 26 页)

起信息传输的循环,使得性能下降。

目前的跨层设计的方法有许多,不同的跨层设计方法对应着不同的网络应用,如何统一跨层设计中层与层之间的交互界面和设计框架,以及不同的跨层设计如何互联互通也是我们面临的难题。此外,针对不同的网络应用,裁剪相应的跨层方法,满足用户的要求,减轻开发的压力也是我们需要解决的问题。

传统的网络体系结构协议栈不同层之间相对独立,便于标准化和配置。而跨层设计结构主要通过增加协议栈中不同协议层的直接通信,共享有效信息来提高网络性能,需要协议栈内部不同层之间的相互作用。这两种结构的互联互通面临着巨大的挑战。因此,设计具有弹性的松散耦合的跨层设计结构,在保持传统网络各层相对独立性的同时,优化网络的性能是未来的发展方向。

结束语 随着 Ad hoc 无线网络技术的发展,跨层设计越来越受到人们的重视。跨层设计是 Ad hoc 无线网络的重要研究课题,通过跨层设计能较好地克服 Ad hoc 无线网络无中心控制节点、网络拓扑快速变化、节点资源和网络带宽受限等问题带来的影响,提高网络的性能。

本文探讨了跨层设计的定义、原因及优势,并将现有的跨层设计进行了分类和比较,指出了今后的跨层设计方向是设计具有松散耦合的跨层结构。

参 考 文 献

- 1 Chlamtac I, Conti M, Liu J. Mobile Ad Hoc Networking: Imperatives and Challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2003, 1(1): 13~64
- 2 Corson M S, Macker J P, Cirincione G H. Internet-based Mobile Ad Hoc Networking [J]. *IEEE Internet Computing*, 1999, 3(4): 63~70
- 3 Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy constrained Ad Hoc wireless networks [J]. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2002. 8~27
- 4 Conti M, Maselli G, Turi G, Giordano S. Cross-layering in mobile ad hoc network design [J]. *IEEE Computer special issue on ad hoc networks*, February 2004
- 5 Shakkottai S, Rappaport T S, Karlsson P C. Cross-layer Design for Wireless Networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(10): 74~80
- 6 ElBatt T, Ephremides A. Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad-hoc Networks [J]. *IEEE Transaction on wireless communications*, 2004, 3(1): 74~85
- 7 Toumpis S, Goldsmith A J. Performance, optimization, and cross-layer design of media access protocols for wireless Ad hoc networks [J]. *IEEE ICC*, 2003, 3: 2234~2240
- 8 Tanenbaum A S. *Computer Networks (Third Edition)*. Prentice Hall International, Inc. 1996
- 9 Conti M, Crowcroft J, Maselli G, Turi G. A Modular Cross-layer Architecture for Ad hoc Networks. In: Jie Wu, ed. *Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*. CRC Press LLC, 2004
- 10 Radunovic B, Boudec J Y L. Joint scheduling, power control and routing in symmetric, one-dimensional, multi-hop wireless networks [J]. *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 2003
- 11 Crowcroft J. Is layering Harmful? [J]. *IEEE Network Magazine*, 1992, 6(1): 22~24
- 12 Tsatsanis M K, Zhang R, Banerjee S. Network-assisted diversity for random access wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000
- 13 So J, Vaidya N. Multi-channel MAC for ad hoc networks; Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver [C]. In: *Proceedings of ACM MOBIHOC*, 2004
- 14 Cao Min, Raghunathan V, Kumar P R. Cross-Layer Exploitation of MAC Layer Diversity in Wireless Networks submitted to ACM MOBIHOC, 2006
- 15 Xu Y, Heideman, Esten D. Adaptive energy-conserving routings for multihop ad hoc networks; USC Informatics Sciences Institute. Research Re@527. October 2003. [Online]. Available: <http://www.isi.edu/johh/PAPER/SIXu00a.html>
- 16 Setton E, Yoo T, Zhu Xiaoqing, Goldsmith A, Girod B. Cross-Layer Design of Ad Hoc Networks For Real-time Video Streaming [J]. *IEEE Wireless Communications*. August 2005. 59~65
- 17 Xylomenos G, Polyzos G C. Quality of service support over multi service wireless internet links [J]. *Computer Networks*, 2001, 37 (5): 601~171
- 18 Kliazovich D, Granelli F. Cross-Layer Congestion Control in Multi-hop Wireless Local Area Networks [C]. In: *First International Conference on Wireless Internet (WICON'05)*, 164~171
- 19 Ho W, Lee Y H, Andersen T D. A Simple and Effective Cross Layer Networking System for Mobile Ad Hoc Networks [C]. *PIMRC*, 2002. 1952~1957
- 20 Li Yun, Ephremides A. Joint Scheduling, Power Control, and Routing Algorithm for Ad-Hoc Wireless Networks [C]. In: *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2005
- 21 Chiang M. To Layer or Not to Layer: Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks [C]. In: *Proc. of Infocom*, March 2004
- 22 Chiang M. Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks; Jointly optimal congestion control and power control [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun*, 2005, 23(1): 104~116
- 23 Lin X, Shroff N B, Srikant R. A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun*, 2006, 24(8): 1452~1463
- 24 Kawadia V, Kumar P R. A Cautionary Perspective on Cross Layer Design [J]. *IEEE Wireless Commun*, 2005, 12(1): 3~11