

自组网中基于多信道的功率控制技术^{*})

付瑞雪 李东生 向 勇

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘要 自组网介质访问控制协议是影响自组网性能的重要因素。形式化地描述并分析了结合多信道和功率控制技术的自组网 MAC 协议性能特征。NS-2 仿真实验表明,与没有功率控制的 AODV 相比较,在功率控制技术中合理的引入多信道技术,可有效的降低功率控制所引发的碰撞增加问题,增加节点和网络的生存时间。

关键词 自组网,功率控制,多信道

Multi-channel Based Power Control for Mobile Ad hoc Networks

FU Rui-Xue LI Dong-Sheng XIANG Yong

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Medium access control(MAC)protocol is one of the most important factors which affect MANET's performance. Characteristics of power control MAC combined multiple channel in MANET are described and analyzed in formalization language. The NS-2 simulations revealed that introducing proper multi-channel technique into MANET can effectively decrease packets collision among nodes which transmit radio with different power, and prolong the life time of nodes and network in comparison with AODV that has no power control.

Keywords Ad hoc, Power control, Multi-channel

1 引言

无线自组织网络是“带无线收发装置的移动节点组成的一个多跳的临时性的自治系统”^[1],由于其灵活、可移动等特性,能够用于军事、救灾等特殊领域,而正引起越来越多研究和关注,其中功率控制技术是当前自组网研究关注的一个热点。通过调整适当的信号发射功率,不仅能够延长节点和网络的生存时间,同时能够增加网络的容量;然而,功率的调整也会带来诸如增加网络碰撞、系统开销等问题。本文把多信道技术和功率控制相结合,形式化地描述了多信道条件下的功率控制方法,并在 NS-2 下进行了仿真实验。

本文内容安排如下。第 2 节综述了自组网多信道和功率控制技术的相关工作。第 3 节形式化地描述多信道条件下的功率控制方法,并进行了分析研究。第 4 节通过实验仿真对性能进行了分析,最后给出结论。

2 相关工作

在自组网中引入功率控制技术,能够有效地减少能量消耗,同时能够增加网络的容量。当通信双方距离较近时,以较小功率传输可减少不必要的能量消耗。当通信双方距离较远时,相比于少量长距离中转,采用多跳短距离传输可使能量消耗更小;同时还可有效减少长距离传输带来的干扰和冲突^[2],使得在相同的时空域内,可有更多的节点对在相同信道上同时传输,提高了网络的通信容量。当前国内外自组网中功率控制技术研究主要集中在网络层的功率控制路由技术^[3,4],MAC 层的功率控制 MAC 协议以及基于功率控制的拓扑管理技术。

功率控制技术主要是通过降低射频的发射功率来实现的,功率的降低势必会使得节点单跳所能到达的邻居节点数减少,而发射功率变化也会带来碰撞的增加。在保证网络连通性的前提下,通过降低射频发射的功率,精简了网络的连通度,但这种调低功率的节点间通信时,可能会受到以高功率传输的邻居节点的干扰和碰撞。当以最大功率发送 RTS/CTS,适当功率发送数据时,能够最大限度地消除隐藏终端同时降低能量消耗,但当有节点移动导致其他正在进行数据传输的节点纳入其最大功率的传输范围(或干扰范围)内时,由于无法监听到正在进行的低功率数据传输,这时发送 RTS/CTS 会将正在进行的数据传输碰撞掉。可见,在单信道条件下的功率控制虽然能够降低能耗,但碰撞会增加,加大了重传次数,也增加了能量的消耗。为了更好的解决功率控制所带来的碰撞增加的问题,本文尝试在功率控制技术中引入多信道技术。

多信道技术主要有频分、码分和跳频等。不同的多信道技术有各自的优缺点,本文主要关注频分技术。当前的频分多信道可分成多接口多信道与单接口多信道两种模式。采用多接口多信道方式时,每个节点可配有多于一个的独立无线收发模块,每个模块都具有自己的物理层和 MAC 层,独立工作互不影响。每个接口可以工作在不同的频点。采用单接口多信道方式时,每个节点只具有一个无线收发器,任何时刻每个节点只能在一个频点上接收或者发送数据,节点可在多个频点间切换。不同节点可在不同频点同时工作,从而提高了系统容量。多接口多信道技术能够提供更高的信道访问性能,但由于接口增加导致额外的能量消耗,同时会带来更高的成本,因此多接口多信道还很难在实际中广泛应用。本文仅

^{*})本文得到国家自然科学基金项目(60273010)和清华大学 985 基础研究基金项目的资助。付瑞雪 硕士研究生;李东生 博士研究生;向勇 副教授,硕士生导师。

讨论单接口多信道技术与功率控制的结合。

3 多信道条件下的功率控制

本节主要利用形式化的手段,描述分析了多信道条件下的功率控制。

3.1 问题描述分析

自组网的拓扑结构可以表示为一个无向图 $G = \{V, E\}$, 其中 V 为顶点集合, 表示自组网节点集, E 为顶点间边的集合, 表示可直接通信的自组网节点对集合。在无向图中, 边的属性仅为存在与否, 而在自组网拓扑结构描述中, 节点间的边有更多复杂的属性。下面给出自组网拓扑结构图中边的定义。

定义 1 在边集 E 上定义边的属性函数 $P: E \rightarrow R^n$, 表示每个边 $e(v_i, v_j) \in E$ 的一系列属性, $v_i, v_j \in V$ 。

本文关注的属性包括发送节点传输功率、目标节点接收功率等级、当前信道三项, $P = \langle p, r, c \rangle$ 。因此, 一个边 $e(v_i, v_j)$ 的属性为 $P(v_i, v_j) = \langle p(v_i, v_j), r(v_i, v_j), c(v_i, v_j) \rangle$, 其中: $p(v_i, v_j)$ 为节点 v_i 发往节点 v_j 的传输功率; $r(v_i, v_j)$ 为节点 v_j 接收节点 v_i 的传输的接收功率等级; $c(v_i, v_j)$ 为边 $e(v_i, v_j)$ 的信道。

定义 2 节点接收灵敏度为 S , 是节点正确接收数据的接收功率等级阈值。

定义 3 定义信道分配函数 $\gamma(v_i, v_j)$,

$$\gamma(v_i, v_j) = \begin{cases} c(v_i, v_j), & \text{可用信道存在时} \\ \text{undefined}, & \text{others} \end{cases}$$

根据信道分配函数定义, 两个节点间如果能够分配到一个信道, 则返回该信道的信道值。否则返回空。

定义 4 边 $e(v_i, v_j)$ 存在的充分必要条件为: 当 $p(v_i, v_j) = PT_{\max}$ 时, $r(v_i, v_j) \geq S$ 。其中 $PT_{\max}$ 为节点能够使用的最大传输功率。即

$$pe(v_i, v_j) = \begin{cases} 1, & \text{若 } p(v_i, v_j) = RT_{\max}, \quad r(v_i, v_j) \geq S \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

定义 4 的边存在条件可解释为, 当节点 v_i 使用最大发射功率传输时, 节点 v_j 处的接收功率等级大于节点接收灵敏度阈值 S 时, 边 $e(v_i, v_j)$ 存在。

定义 5 节点 v_i 发往节点 v_j 的数据可被正确接收的条件为: $r(v_i, v_j) \geq S$ 且 $\gamma(v_i, v_j)$ 有定义, $v_i, v_j \in V$ 。

定义 6 边 $e(v_i, v_j)$ 的最小传输功率 $\lambda(v_i, v_j)$ 定义为节点 v_j 正确接收从节点 v_i 发来数据的最小传输功率, $v_i, v_j \in V$ 。

在只考虑信道衰减不考虑干扰等其它情况下, 由定义 5 有

$$\lambda(v_i, v_j) = p(v_i, v_j) \frac{S}{r(v_i, v_j)}$$

其中, $p(v_i, v_j)$ 为节点 v_i 发往节点 v_j 的传输功率, $r(v_i, v_j)$ 为在该传输功率下, 节点 v_j 的接收功率等级。该式的含义为, 根据节点 v_i 发往节点 v_j 的传输功率、在该传输功率下节点 v_j 的接收功率等级以及节点正确接收的接收功率等级阈值, 可计算出使得节点 v_j 能够正确接收数据所需要节点 v_i 的最小传输功率。

定义 7 最小能耗传输问题 (Minimum Energy Consume Transmit Problem, MECTP)。给定一个自组网 $G = \{V, E\}$, 以及一个最小传输功率函数 λ 和一个信道分配函数 γ , 在保证节点数据传输的情况下,

$$\text{Min} \sum_{i \in L(v_i, v_{i+k}), n=0}^{k-1} \lambda(v_{i+n}, v_{i+n+1})$$

其中, $L(v_i, v_{i+k})$ 为节点对 (v_i, v_{i+k}) 间路径集。

MECTP 问题实质是, 对给定节点对 (v_i, v_j) , $v_i, v_j \in V$, 要寻找一条路径 $l(v_i, v_j)$, 使得沿该路径传输数据时的能耗最小。上述定义要求保证节点间能进行数据传输。这包含下面两个具体条件。

条件 1: 对于任意 $v_i, v_j \in V$, 若 $p(v_i, v_j) = PT_{\max}$, $r(v_i, v_j) \geq S$, 则 $\gamma(v_i, v_j)$ 有定义。

条件 2: 对于任意 $v_i, v_j \in V$, $L(v_i, v_j) \neq \Phi$ 。

MECTP 问题可分成两个问题, 最小功率路由问题和信道分配问题。对于一个自组网 $G = \{V, E\}$, 假定当所有节点都使用最大传输功率时, 它是一个连通图。将所有节点都使用最大功率传输, 则可获得每个节点度都最大化的一个网络拓扑。将每条边的最小传输功率 (即保证该边存在的取小传输功率) 标记为该边的权值, 则可以得到一个带权值的无向图 $G' = \{V', E'\}$ 。这时, 不考虑信道分配因素的 MECTP 问题转化为一个多源最短路径路由问题, 即计算边权值均大于 0 的图中任意两节点间的最短路径问题。使用 Dijkstra 算法可以获得图 G' 中单源最短路由问题的解, 改进 Dijkstra 算法可以获得 G' 中多源最短路径的解。

信道分配问题涉及多信道机制。典型地, 在多接口多信道中, 信道分配问题可以转化成一个图着色问题。

在 MECTP 问题中, 虽然同时存着上述两个问题, 但是, 它们分处在网络的两个层次: 多源最短路径路由问题是网络层问题, 而信道分配是 MAC 层问题。二者可以独立解决并且不会相互产生影响。

3.2 多信道

本文并不展开讨论信道分配技术, 仅对信道分配定义一系列的使用规则, 通过该规则确定信道的分配。在定义信道使用规则前, 需要对物理信道做如下假设:

假设 1: 所有节点配备的无线收发器都是半双工的。对于单个无线收发器来说, 同一时刻只能在一个信道上接收或者发送。

假设 2: 所有节点配备的都是全向天线。

假设 3: 所有节点具有信道切换能力, 且信道切换时间很短, 相对数据传输过程而言可以忽略。

假设 4: 网络中节点数小于信道总数。

我们把信道分为公共信道与数据信道两种类型。公共信道的媒体访问方式为 CSMA/CA 方式。数据信道在分配成功直接访问。

假设 5: 存在一个公共信道 (也称控制信道), 该信道的分配函数为 $c(v_i, v_j) = 0, v_i, v_j \in V$ 。

假设 6: 根据假设 4 可知, 能为每个节点分配一个独立固定的数据信道, 定义节点对在进行数据传输时, 使用发送节点的所分配的固定信道。

上述信道使用假定简化了本文的讨论, 但在实际网络中同时工作的节点数可能远远超过可用信道数, 如何将有限的信道数分配给各个节点, 保证最大限度地并发通信能力, 也是当前研究人员的研究热点问题。

多信道访问是通过定义访问规则来控制的。节点对信道访问的规则定义如下。

规则 1: 节点在无数据传输时, 停留在公共信道监听。

规则 2: 所有 MAC 层控制信令 (包括 RTS/CTS/ACK)

都只在公共信道进行传输。

规则 3: 所有网络层的协议控制分组 (RREQ、RREP、RERR 等)、广播分组 (HELLO 等) 均只在公共信道进行传输。

规则 4: 所有数据分组在接收节点的数据信道进行传输。

由上述规则可知, 一个数据分组的发送过程为, 1) 在公共信道成功地发送了 RTS, 并收到了相应目标节点的 CTS; 2) 双方共同切换到相应的数据信道采用最小传输功率进行数据传输。3) 传输完成后, 再返回公共信道。

采用这样的多信道访问策略能够极大地减少网络中的碰撞机率。由于网络中数据分组较长, 传输时产生碰撞的几率很高, 特别是动态调整数据分组的传输功率后, 更容易被邻居节点的控制分组碰撞掉, 转移到独立信道进行传输能够消除这种碰撞; 控制分组虽然仍在公共信道传输, 但由于长度很短, 碰撞的几率小, 因而网络中总的碰撞次数降低了。

我们把采用最小传输功率和多信道访问规则的 MAC 算法称为基于多信道的最小能耗传输 (MB-MECT)。该算法一方面通过功率控制技术来降低能量消耗, 另一方面通过多信道的引入来解决由于降低功率所产生的碰撞增加等新的问题, 从而更好地降低能量的消耗。

4 性能分析和结论

本节对 MB-MECT 进行定性分析以及 NS-2 下 MB-MECT 和 AODV@802.11 对比实验的仿真结果分析, 通过仿真得出结论。

4.1 定性分析

在自组网中, 当全网所有节点均采用单一最大功率、无功率控制单信道 (Maximum Common Power Single Channel, MCPSC) 传输时, 网络连通度最高。而 MB-MECT 并没有降低节点原有的度, 这是因为节点的拓扑信息来自网络层控制分组和 MAC 层控制信令, MB-MECT 对控制分组和控制信令均使用了与 MCPSC 相同的最大功率进行传输, 因此, 其拓扑结构与 MCPSC 相同。

MB-MECT 规定所有的控制分组和控制信令均在公共信道传输, 且所有未进行数据传输的节点均停留在该公共信道进行监听; 而进行数据传输时, MCPSC 和 MB-MECT 都会由于正在进行通信而无法获得其他节点发送的控制分组。因此, MB-MECT 使用多信道并未对获得协议控制信息的能力产生影响。多信道和功率控制的技术却有效地降低了 MB-MECT 的数据碰撞和能量消耗。下面通过仿真实验进一步分析 MB-MECT 的性能。

4.2 仿真分析

在 NS-2 环境下对 MB-MECT 与基于 802.11 的 AODV 协议 (AODV@802.11) 构建的无线自组网进行了对比实验。其中, AODV@802.11 就是典型的 MCPSC。仿真环境与场景设置如下, 初始能量均为 255, 最大发射功率相同的 50 个节点, 随机分布在 1200m * 1200m 的二维空间中。数据流是随机产生的 20 个恒定速率流, 流速率为 4 分组/秒, 每分组固定长度为 512 字节。节点在最大发射功率时有效传输距离为 400m, 在发送和接收状态下, 单位时间 (s) 内能量消耗分别为 3 与 2。节点移动速度为最大 10m/s, 在移动到预定位置后, 停止一定时间再继续移动。根据节点不同的初始化位置分布生成共计 10 个场景, 分别进行实验, 将实验数据取平均做为最终实验结果, 以消除场景的特异性带来的影响。

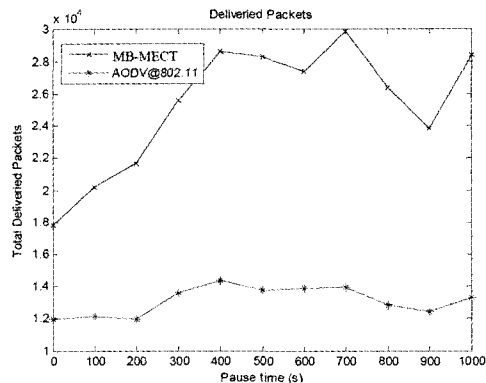


图1 成功递交分组数对比

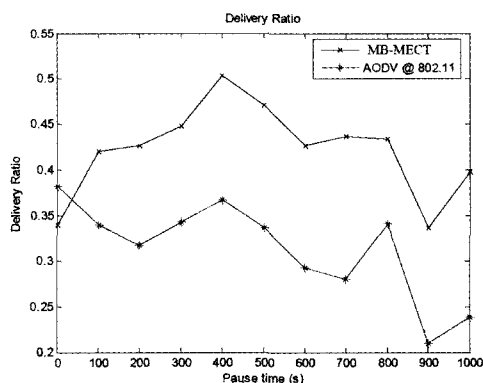


图2 成功递交分组率对比

图1和图2为成功递交分组数和分组率的比较。MB-MECT 的均明显多于 AODV@802.11。这是因为功率控制技术, 减少了能量消耗, 延长了节点和网络生存时间, 能够传输更多的分组。而功率控制和多信道的结合, 降低了碰撞几率, 能够增加递交的分组数。需要注意的是, 图中的横坐标表示节点停留的时间, 表示其移动性, 分组递交成功率最高点出现于节点移动后停止的某一段时间内, 这是因为网络拓扑变化速度过快会导致路由频繁断开, 因而造成过大的路由维护和数据重传开销, 从而浪费了节点的能量, 降低了分组递交率。而拓扑变化过慢可能造成网络碎片迟迟无法通过节点移动来弥补, 因而效率过低。

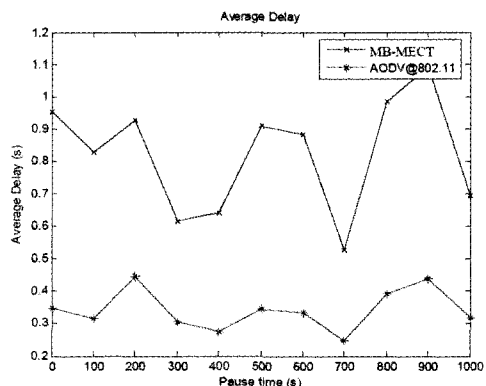


图3 分组平均延时对比

图3为分组平均延时的对比结果。为了降低能量的消耗, 选择跳数更多、每跳传输距离更短——发送功率更低的链路, 而没有考虑跳数因素, MB-MECT 相比传统 AODV@

802.11 分组延迟有明显的上升。最小化功率和跳数适当是一种均衡(trade-off),过长的链路在导致延迟上升的同时还存在着传输失败概率上升的问题,进而会导致重传,增加能量消耗;而过于严格的跳数控制又会影响到路由节省能量的效果。二者在何种层面达到均衡将是今后需要着重研究的问题之一。

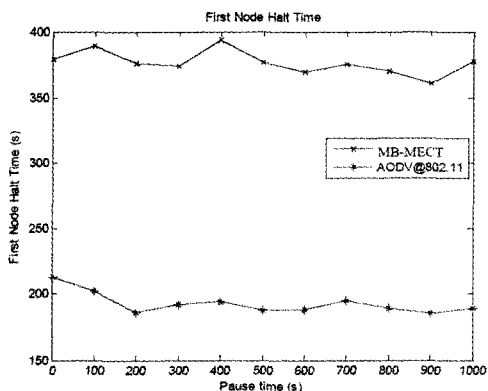


图4 第一个能量耗尽节点能量耗尽时间

图4为第一个节点能量耗尽时出现时间的比较。最小功率路由带来的能量节省和多信道降低碰撞几率减少了不必要的能量消耗,因此节点和网络的生存时间明显延长。

通过上面的仿真实验,可以看出相比不加功率控制的单信道 AODV@802.11 自组网,MB-MECT 明显延长了网络的生存时间,提高了成功递交分组量和分组率,取得了良好的节省能量效果。功率控制技术有效地降低了能量得消耗,功率调整带来的碰撞增加的问题,通过多信道的引入,有效地降低了分组间的碰撞,同样减少了重传等不必要的能量消耗。MB-MECT 的最小功率路由选择的多跳短距离路径却导致传输延迟明显上升,付出了一定网络性能的代价。

作为本文的后续工作,我们将研究如何减少最小功率路由时的端到端延时。本文也没有对信道分配问题进行深入分析,而多信道的分配问题也是自组网研究的热点问题。需要进一步的研究工作来确定合理有效的多信道分配策略,以在

有效增加信道利用率的同时,提高网络的复用性。

参考文献

- 1 英春,史美林. 自组网体系结构研究[J]. 通信学报, 1999
- 2 Gupta P, Kumar P R. The Capacity of Wireless Networks. Information Theory, IEEE Transactions on Publication, 2000, 46 (2):388~404
- 3 Stojmenovic I, Lin X. Power-aware localized routing in wireless network. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2001. 1122~1133
- 4 Zhang Baoxian, Mouftah H T. Energy-aware on-demand routing protocols for wireless ad hoc networks Wireless Netw, 2006, 12: 481~494
- 5 Doshi S, Bhandare S, Brown T X. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6 (3):50~66
- 6 Jung E S, Vaidya N H. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. Wireless Networks, 2005, 11:55~66
- 7 Zhang Jun, Fang Z, Bensaou B. Adaptive power control for single channel ad hoc networks Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on May 2005, 5:3156~3160
- 8 Krunz M A, POWMAC M. a single-channel power-control protocol for throughput enhancement in wireless ad hoc networks Selected Areas in Communications. IEEE Journal on May 2005, 23 (5):1067~1084
- 9 Jung E S, Vaidya N H. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. 2002. MOBICOM'02, Atlanta, Georgia, USA. 2002. 23~28
- 10 Muqattash A, Krunz M. Power Controlled Dual Channel (PC-DC) Medium Access Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM Conference, 2003. 470~480
- 11 Wattenhofer R, Li L, Bahl P, et al. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks. In: Proc. IEEE INFOCOM 2001 Conference, Anchorage, Alaska, 2001. 22~26
- 12 Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M, Bisdikian C. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In: Proc. ICNP'01, 2001
- 13 Mo J, Wilson So H S, Walrand J. Comparison of multi-channel MAC protocols. In: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Oct. 2005

(上接第26页)

利用此平台已经成功地对 AODV、DSR、DSDV 等 Ad Hoc 路由算法以及实验室在项目研究中提出的 Ad Hoc 网络、空间信息网的路由和网络安全算法在多种实际网络环境参数下进行了调试,提高了测试精度,SEP 平台上调试成功的协议和算法在实际应用中均取得了良好效果,加快了开发速度,节省了实验费用。

参考文献

- 1 Toh C-K. Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems[M]. Prentice Hall PTR, 2002. 55~77
- 2 Baloch F, Strandmark C. AD-HOC Networks and layer 2 tunnels [J]. Computer Engineering, 2004, 5: 246~247
- 3 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 3~7, 26~30
- 4 王晓曦, 王秀利, 周津慧. NS2 网络仿真器功能扩展方法及实现 [J]. 小型微型计算机系统, 2004(6): 1009~1014
- 5 Nordstrom E, Gunnndberg P, Lundgren H. A Testbed and

Methodology for Experimental Evaluation of Wireless Mobile Ad hoc Networks[A]. In: Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities[C], 2005. 100~109

- 6 Lundgrn H, et al. A large-scale tested for reproducible Ad Hoc protocol evaluations[A]. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC 2002)[C]. Orlando Florida, Mar 2002
- 7 龚月荣, 林晓明. 移动自组网反应式路由协议在 Linux 中的实现 [J]. 计算机工程, 2006, 26(7): 98~100
- 8 钟晓峰, 杨帆, 王有政, 等. A d hoc 网络多层混合实验系统的设计与实现[J]. 计算机应用, 2006, 30(5): 1560~1562
- 9 Haas Z J, Pearlman M R, Samar P. The Bordercast Resolution Protocol (BRP) for Ad Hoc Networks [Z]. In: IETF MANET Working Group INTERNET - DRAFT, 2001
- 10 Fall K. Network emulation in the VINT/ NS simulator [J]. In: Computers and Communications Proceedings. IEEE International Symposium, 2002, 7. 244~250.