

无线 Ad hoc 网络容量的研究综述

戴沁芸 胡修林 苏 钢 张蕴玉

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 无线 Ad hoc 网络容量是评估网络性能的重要参数,它的研究以改善网络性能为出发点,提供构建优质网络的理论依据。本文总结了无线 Ad hoc 网络容量的研究成果,根据方法的不同将其分为两类:一类是采用不同的方法推导网络容量的极限;另一类是采用不同的假设条件和业务类型推导网络容量的极限。在此基础上,我们对无线 Ad hoc 网络容量研究的发展趋势做了预测。

关键词 无线 Ad hoc 网络,网络容量,网络模型,智能天线,超宽带

A Survey of the Capacity for Wireless Ad hoc Networks

DAI Qin-Yun HU Xiu-Lin SU Gang ZHANG Yun-Yu

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract Network capacity is a key characteristic to evaluate the performance of wireless ad hoc networks. Discussions about the capacity aim to improve the network capability and provide the theoretic foundation for constructing the favorable network. In this paper, we give a comprehensive overview of related work on deriving the wireless capacity and roughly classify existing work into two kinds. One kind is the investigation for improving the capacity bounds and other kind is the work for deriving the bounds under different assumptions. Finally, we forecast the research direction on the capacity of wireless Ad hoc networks in the future.

Keywords Wireless ad hoc network, Network capacity, Network model, Smart antenna, Ultra wide band

1 概述

无线 Ad hoc 网络最初起源于 20 世纪 70 年代美国军事研究领域,它允许多个移动节点在共享的无线信道上进行数据传输,网络中不存在中心控制,具有临时、按需、自动等特性,十分适合军事领域、灾难救援、会议等场合。

Ad hoc 网络节点共享无线信道的各类资源,节点同时传输,引起信号间相互干扰,导致通信质量的下降。人们很自然会考虑这类网络能够长时间支持的数据传输率是多大,这就是网络容量的问题。网络容量是无线 Ad hoc 网络的重要性能参数,它的研究十分复杂。首先要给出网络容量的合理定义。定义不同,分析结果就会有很大差异。其次是网络模型的抽象与建立。网络模型包括各种网络节点的功能模型、网络的拓扑模型以及传输链路模型等。确定这些模型都非常困难:模型太简单,不足以反映网络结构的本质;太复杂,在数学理论上又难于处理。另外,通信方式的选择、业务模型、路由与 MAC 方法,甚至一些新技术(MIMO,智能天线技术)的采用,都会对网络容量产生影响。总之,网络容量的分析非常复杂,需要展开深入研究。

Gupta^[1]建立了静态节点的无线 Ad hoc 网络模型,通过严格的数学推导得到: n 个静态节点组成的随机网络,每个节点的吞吐容量为 $O(1/\sqrt{n})$ 。该结论暗示网络中节点数目的增加是以容量的减少为代价的,当 n 趋于无穷大时,网络容量为零,因此构建大型无线 Ad hoc 网络并不现实。这个悲观的结论导致很多学者纷纷开始寻求提高网络容量的各种方法,它

已经成为无线通信领域又一研究热点。

本文总结了以往无线 Ad hoc 网络容量的研究成果,并根据分析方法的的不同将其分为两类:第一类研究是采用不同的方法推导网络容量的极限,我们将这些方法具体归纳为 4 种;第二类研究是依据不同的假设条件和业务类型推导网络容量的极限,这些附加条件往往更接近实际环境。以此为基础,我们对无线 Ad hoc 网络容量研究的发展趋势做了预测。本文按照如下结构组织行文:第 2 部分介绍了无线 Ad hoc 网络容量的定义,以及相关的基础理论;第 3 部分对第一类研究中的各种方法进行归纳;第 4 部分对第二类研究的各种结论做了说明;最后总结全文。

2 无线 Ad hoc 网络容量研究的基础理论

文[1]被认为是无线 Ad hoc 网络容量研究领域的里程碑,它建立了经典的 Ad hoc 网络模型,明确了 Ad hoc 网络容量的定义,在网络容量的分析过程中为简化数学表达采用了特殊的标记符号。上述这些为网络容量的后续研究奠定了基础,其结论已经被广泛引用。

这里特别说明,为简化数学表达,无线 Ad hoc 网络容量采用了 Knuth 符号表示法^[2]:① $f(n)=O(g(n))$ 表示存在常数 c 和整数 N ,当 $n>N$ 时, $f(n)\leq cg(n)$;② $f(n)=\Theta(g(n))$ 或 $f(n)=\Omega(g(n))$ 既可以表示 $f(n)=O(g(n))$ 也可以是 $g(n)=O(f(n))$ 。

2.1 无线 Ad hoc 网络容量的定义

无线 Ad hoc 网络容量的定义与传统的无线蜂窝网络不

*)国家自然科学基金(60496315)和国家“863”计划(2003AA12331005)资助。戴沁芸 讲师、博士研究生;胡修林 教授、博士生导师;苏 钢 博士研究生;张蕴玉 教授。

同。蜂窝网络将容量定义为固定频带内最多能够容纳的信道数目或用户数目^[3],而 Ad hoc 网络容量则是以节点平均每秒成功传输的数据量来衡量。

可行吞吐量(Feasible Throughput)^[1]:网络中的节点数目为 n ,按照一定的时空分配方案,在 $[(i-1)T, iT]$ 时间段内 ($T < \infty$),网络中每个节点发送到相应目的节点的比特数为 $T\lambda(n)$,那么称该网络的可行吞吐量为 $\lambda(n)$ 比特/秒。

无线 Ad hoc 网络容量^[1]: $\lambda(n)$ 是无线 Ad hoc 网络的可行吞吐量,若存在常数 $c > 0, c' < +\infty$,使 $\lim_{n \rightarrow \infty} P(\lambda(n) = cf(n)) = 1, \liminf_{n \rightarrow \infty} P(\lambda(n) = c'f(n)) < 1$ 成立,称该网络的吞吐容量为 $\Theta(f(n))$ 比特/秒,相应的网络容量是 $\Theta(nf(n))$ 比特/秒, n 为网络中的节点数目。

2.2 无线 Ad hoc 网络容量的基础理论

Gupta^[1]建立了两种无线 Ad hoc 网络模型:任意网络和随机网络。前者假定网络中的各类设置(例如节点位置、传输功率、业务类型等)任意选择,后者则是随机选择。由于随机网络模型更加易于数学分析,所以在研究领域被普遍采用。本文以随机网络模型为基础展开对容量问题的讨论。

随机网络模型假定有 n 个节点独立均匀且随机地分布在单位球体表面或单位圆平面;节点具有相同的传输射程及发射功率,并随机选择其目的节点。这里定义了两种传输模型:协议模型和物理模型。在协议模型中,节点 i 到 j 成功传输必须满足以下两个条件:① $|X_i - X_j| \leq r$, ② $|X_k - X_j| \geq (1 + \Delta)r$ 。这里 X_i 和 X_j 是节点 i 和 j 在网络中的位置, r 是节点的传输射程, $\Delta > 0$ 是一个常数。在物理模型中,所有的节点具有相同的传输功率 P ,节点 i 到 j 成功传输的条件为

$$\frac{P}{|X_i - X_j|^\alpha} \geq \beta, \text{ 这里 } \Gamma \text{ 是给定时间内同时传输的节点集合, } N \text{ 是环境噪声, } \beta \text{ 是成功传输所需要的最小信噪干扰比(SIR).}$$

经过严格的数学推导得出:在协议模型下,无线 Ad hoc 网络节点吞吐容量的上下限均为 $O(1/\sqrt{n \log n})$;在物理模型下,吞吐容量的上限为 $O(1/\sqrt{n})$,下限为 $\Omega(1/\sqrt{n \log n})$ 。该结论说明无线 Ad hoc 随机网络的容量会随着节点数目的增加而降低,当 $n \rightarrow \infty$ 时,网络容量为零。由此判定,构建大型无线 Ad hoc 网络并不现实。

经过严格的数学推导得出:在协议模型下,无线 Ad hoc 网络节点吞吐容量的上下限均为 $O(1/\sqrt{n \log n})$;在物理模型下,吞吐容量的上限为 $O(1/\sqrt{n})$,下限为 $\Omega(1/\sqrt{n \log n})$ 。该结论说明无线 Ad hoc 随机网络的容量会随着节点数目的增加而降低,当 $n \rightarrow \infty$ 时,网络容量为零。由此判定,构建大型无线 Ad hoc 网络并不现实。

3 采用不同方法提高网络容量的极限

继 Gupta 后,科研工作者便开始努力寻找提高网络容量的各种方法。我们将与此相关的众多文献分为两类,一类是采用不同的方法提高 Ad hoc 网络容量的极限,这些方法大致可归纳为以下 4 种。

3.1 利用节点的移动特性提高网络容量的极限

Grossglauser 等人^[4]假定网络中的节点都是运动的,且节点位置平稳均匀分布,具有各态历经性。经过严格的数学推导得出:单位区域节点密度越大,网络中每对源-目的节点(S-D)的平均吞吐量保持为常数的概率越接近 1。Diggavi^[5]规定网络中节点的运动轨迹是单位球体表面上的一个圆环,每个节点仅在特定的圆环上运动。经过推导得出结论:网络容量随节点密度的增加保持为常数。该结论与文[4]中的推导一致。上述研究说明,网络节点引入移动性后,即使节点仅具有一维移动特性,网络容量随节点密度的增加依然会保持

稳定,所以可以认为节点的移动能够提高网络容量的性能,但数据分组传输的延迟时间可能很大。

随后,部分学者开始探讨网络引入运动节点后,延迟时间在一一定的允许范围内相应的容量性能。Bansal 等^[6]假定网络中有 n 个静态节点随机均匀分布, m 个移动节点按照 uniform mobility model^[7]运动。经过严格的数学推导得出:数据分组传输引入的最大延迟时间为 $2d/v$,相应地网络吞吐容量至少是 $O(\frac{\min(m, n)}{n \log^3 n})$,这里 d 是网络区域的直径, v 是移动节点的速率。Perevalov 等^[8]考虑了运动节点构成的无线 Ad hoc 网络,讨论了网络容量与可允许的最大延迟时间的关系。他们推导并证明了该网络存在一个临界值,数据传输的延迟时间 d 若小于该临界值,那么节点移动性带来的容量增长并不大;若 d 超过该临界值,则网络容量的增长近似为 $d^{2/3}$ 。另外,网络临界值的增长近似为 $n^{1/4}$, n 是网络中的节点数目。

从理论上讲,网络容量与传输延迟时间这两个参数是相互矛盾的:一方面,提高网络容量,需要在所有时间使尽可能多的节点都处于发送或接收状态,这就要求节点存储的数据不为零,从而导致数据传输时间延长。另一方面,为降低延迟,会希望传输的数据按其路径,在所达之处节点能够立刻发送分组到下一节点,直至目的地,这就要求数据在节点内部排队传输的竞争尽可能小,或者说希望节点内部的数据存储为空,那么网络容量便不可能提高。El Gamal^[9]分别研究了静态节点和动态节点的无线 Ad hoc 网络,推导了容量与延迟时间的优化关系。在静态网络中,容量与延迟时间的优化关系为 $D(n) = O(nT(n))$,其中 $T(n)$ 和 $D(n)$ 表示了节点吞吐容量与传输延迟时间。在动态网络中,若每个节点吞吐容量量化为 $\Theta(1)$,则相应的延迟时间就为 $\Theta(n^{1/2}/v(n))$, $v(n)$ 表示节点的运动速度。

3.2 利用基础设施提高网络容量的极限

有学者^[10]提出了在无线 Ad hoc 网络中添加少量基站来增强网络性能的方案,它将蜂窝系统与 Ad hoc 网络结合,又称为混合无线网络。混合无线网络被认为是未来移动通信系统的重要发展方向,吸引了学术界和产业界越来越多的关注。

关于无线 Ad hoc 网络引入基站能否提高网络容量的问题已备受关注。Liu^[11]将 m 个基站放置在 n 个节点的 Ad hoc 网络中,基站位置遵循一定规律,在此基础上讨论了两种路由策略,得到了一个共同的结论:若基站数目 m 的增长低于某门限,增加基站对提高网络容量的作用就很小;若 m 的增长高于该门限,则网络中最大吞吐容量为 $O(m)$ 。该结论说明:只有当基础设施的投资达到足够大以后,在无线 Ad hoc 网络中添加基站才能提高其容量,此时网络节点的吞吐容量与基站数目呈线性增长关系。Kozat 等^[12]考虑了网络节点和基站被随机放置的情况。研究发现:若节点数目 n 与基站数目 m 间满足文[11]提到的门限关系,则每个节点的吞吐容量为 $\Theta(1/\log(n))$ 。

3.3 利用智能天线技术提高网络容量的极限

智能天线是近年来移动通信领域的研究热点,它利用数字信号处理方法,采用了先进的波束转换和自适应空间数字处理技术,产生空间定向波束,使天线主波束对准用户信号到达方向,旁瓣或零陷对准干扰信号到达方向,充分高效利用有用信号并删除或抑制干扰信号,从而提高系统容量和通信质量。它也被认为是提高无线 Ad hoc 网络容量的有效途径之一。

Yi 等人^[13]讨论了在随机网络中使用智能天线的问题。研究发现:若发射端天线使用的波束宽度为 α ,则网络容量可以获得 $2\pi/\alpha$ 的增益;若接收端天线使用的波束宽度为 β ,则可获得 $2\pi/\beta$ 的容量增益;若发射端与接收端使用天线的波束宽度分别为 α, β ,则容量增益可以达到 $4\pi^2/\alpha\beta$ 。Peraki 等^[14]分析发现:即使发射端天线能够产生任意窄的波束,且节点的发射功率为保证网络连接的最低电平(上述假设实际上暗示所有的无线干扰都不存在),此时网络容量也仅增至 $O(\log^2(n))$ 。以上结论说明,采用智能天线技术提高无线 Ad hoc 网络容量,其性能增强仅限于一定范围内。

3.4 利用超宽带技术提高网络容量的极限

自从 2002 年 2 月美国联邦通信委员会(FCC)授权将超宽带(UWB)投入商用后,UWB 技术便成为无线通信领域又一研究热点。UWB 信号的定义是:一个信号在 10dB 处的绝对带宽大于 0.5GHz 或信号高端与低端频点之差要大于中心频率的 20%。UWB 技术采用的是极低的发射功率,数据传输率可以达到 100Mbps 至 500Mbps。相应地,它具有了信号隐蔽性好、抗多径和窄带干扰能力强、传输速率高、系统容量大、穿透能力强、低功耗、系统复杂度低等一系列优点,而且利于频率重用,是未来极具竞争力的技术之一。

Negi 等^[15]率先将 UWB 技术应用于 Ad hoc 网络容量的研究,假定网络节点的传输功率都为 W_0 ,在带宽 $B \rightarrow \infty$ 的极限条件下经过严格的数学推导得出:节点吞吐容量的上限为 $O(n \log n)^{(a-1)/2}$,下限为 $\Omega(\frac{n^{(a-1)/2}}{(\log n)^{(a+1)/2}})$ 。Honghai 等^[16]

在文^[15]的基础上采用了渗透理论(the theory of percolation)将 Negi 推导的上下限减少了 $\Theta(n^{(a-1)/2})$ 的数量级。通过上述分析,我们发现:在超宽带条件下,无线 Ad hoc 网络容量随节点数目的增加而增加,这与经典的 Gupta 结论^[1]完全相反,也为构建大型 Ad hoc 网络提供了理论基础。一方面,这说明 UWB 技术极大的应用前景;另一方面,也说明对 Ad hoc 网络的研究,若假设条件不同,其结论也可能完全不同。

Dana 等^[17,18]假定网络中存在 n 个中继节点,且 S-D 对数目不超过 $\sqrt{n}$,传输带宽无穷大,据此推导出:若把传输速率以 $O(f(n))$ 量化,则节点需达到的最小传输功率为 $\Theta(f(n)/\sqrt{n})$,此时的传输带宽必须达到 $\Theta(f(n))$ 。该结论的推导基于简单的“listen and transmit”协议,虽然它不是超宽带下无线 Ad hoc 网络容量、功率、带宽三种指标的最优配置,但它揭示了这三者间存在某种定量关系。

4 在不同假设条件下推导网络容量的极限

关于 Ad hoc 网络容量的另一类研究是在不同假设或业务类型条件下推导出相应的容量极限,通常这些附加条件会更接近实际环境。

Dousse 等^[19]假定信号在以发射端为原点的网络区域内均匀衰减,则节点吞吐量以 $\Theta(1/n)$ 速度递减, n 为网络中节点的数目。Toumpis 等^[20]讨论了在通用信道衰落模型下的无线 Ad hoc 网络容量。研究表明:对静态网络,源点到目的节点的传输速率为 $\Theta(n^{-1/2}(\log n)^{-3/2})$;对动态网络, n 个运动节点的吞吐量保持相等的数量级,且传输的最大延迟时间与 n 无关。若节点允许分组传输的延迟时间为 $\Theta(n^d)$,这里 $0 < d < 1$,那么移动节点到相应目的节点的传输速率为 $\Theta(n^{(d-1)/2}(\log n)^{-5/2})$ 。Xie 等^[21]采用了一种复杂的合作方案以减少干扰,其假设条件与信号的实际衰减十分类似,经过数

学推导得出在超大型 Ad hoc 网络中,容量集合平均的上限为 $O(\sqrt{n})$ 。

此外,一些学者分析了不同业务类型下的网络容量。Gastpar 等^[22]采用文^[1]建立的网络模型,仅考虑中继业务,并规定网络中只存在一对 S-D,其它节点均为中继节点。经过数学推导得出:若允许某种复合网络编码,那么这类网络的容量在节点数目 n 趋近于无穷时近似为 $\Theta(\log n)$ 。Marco 分析了多个源点发送数据至一个目的节点的业务情形,此时网络中仅存在一个目的节点。经过推导得出:随着节点数目 n 的增加,节点吞吐量可量化为 $\Theta(1/n)$ 。这主要是由于网络中仅存在一个目的节点而产生的瓶颈效应。

Toumpis^[23]研究了衰落信道下 3 类无线网络的容量。第一类网络是非对称的,存在 n 个源点与 n^d 个目的节点。若 $1/2 < d < 1$,那么节点平均吞吐量为 $\Omega(n^{1/2}(\log n)^{-3/2})$;若 $0 < d < 1/2$,则平均吞吐量为 $\Omega(n^d/\log n)$ 。第二类网络是簇网络(cluster networks), n 个用户节点(client nodes)和 n^d 簇头节点(cluster heads)。每个用户节点仅与一个簇头节点通信,但具体与哪个簇头节点通信对结论没有影响。该网络的平均吞吐量下限为 $\Omega(n^d(\log n)^{-2})$,上限为 $O(n^d \log n)$ 。第三类是混合无线网络, n 个节点和 n^d 个基站,若 $1/2 < d < 1$,则平均吞吐量的下限为 $\Omega(n^d(\log n)^{-2})$;若 $0 < d < 1/2$,那么利用基站提高网络容量的效果微乎其微,这与文^[11]的结论是一致的。

Li^[24]模拟了小型的 Ad hoc 网络,通过仿真试验进一步证明了文^[1]的理论推导。

总结 无线 Ad hoc 网络是一种新型无线移动网络,其容量是评估网络性能的重要参数。无线 Ad hoc 网络容量的研究以改善网络性能为出发点,提供了构建优质网络的理论依据。近年来,国内外众多学者纷纷开始投入 Ad hoc 网络容量的研究,使其成为无线通信领域又一研究热点。本文总结了无线 Ad hoc 网络容量的研究成果,根据方法的不同将其分为两类:第一类研究是采用不同的方法推导网络容量的极限,包括引入节点移动性、向网络添加基站、智能天线及超宽带技术;第二类研究是根据不同的假设条件和业务类型推导网络容量的极限,这些附加条件通常更接近真实环境。实际上,建立模型不同、假设条件不同,推导结论的差别也很大。目前,虽然有许多学者对无线 Ad hoc 网络容量进行了一定研究,但随着信号处理、通信技术的飞速发展,各类新方法(如 MIMO、空时编码、多用户检测、OFDM)的引入都会使容量发生改变,因此 Ad hoc 网络容量的问题还有待进行更加深入的讨论。

参考文献

- Gupta P. The capacity of wireless network. IEEE Transaction on Information Theory, 2000, 46: 388~404
- Knuth D E. The art of computer programming. MA: Addison-Wesley, 1997
- Rappaport T S. Wireless communications: principle and practice. Prentice Hall. 2002
- Grossglauser M, Tse D N C. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2002, 3: 1577~1586
- Diggavi S N, Grossglauser M, Tse D N C. Even one-dimensional mobility increases ad hoc wireless capacity. IEEE ISIT'02, 2002
- Bansal N, Liu Z. Capacity, delay and mobility in wireless ad-hoc networks. In: IEEE INFOCOM'03, San Francisco, CA, Apr. 2003. 1553~1563

(下转第 8 页)

如 Administrator 工具完成项目管理、RequisitePro 完成需求管理、ClearQuest 完成缺陷管理、SoDA 完成报表生成和管理。

TestDirector 采用 B/S 架构,而 TestManager 和 QA-Center 采用 C/S 架构。这三个工具都可以使用多种第三方数据库系统用于测试资产存储,如 MS Access、MS SQL 和 Oracle。除了测试管理工具,MI、Rational 和 Compuware 公司还提供很多端对端测试解决方案和工具,这三个工具都可以和测试工具集中的其他工具合作。

TestDirector 和 QACenter 重在管理测试实施的流程,而自动化测试的具体运行则由其他专业的工具完成,如 WinRunner 和 LoadRunner 辅助 TestDirector 完成功能测试和性能测试,QARun 和 QALoad 辅助 QACenter 完成功能测试和性能测试。TestManager 除了完成测试流程的管理,还完成具体的性能的测试执行(Robot 能够独立完成功能测试,但是只能完成性能测试的脚本编写),即性能测试的监控也由 TestManager 完成。

TestDirector 的分析模块提供了各种各样的分析报表,支持定制,并能够将报表内容生成多种文档。TestDirector 没有提供专业的版本控制,而是通过目录管理和关联机制实现一定程度的版本控制。支持普通的基于文本的查询功能。

TestManager 支持多种分析报表,可以结合 SoDA 工具实现文档化。还可以结合 ClearCase 实现专业的版本控制,结合 ClearQuest 实现变更管理和检索功能。

定制方面,这三个工具都支持缺陷跟踪的过程定制。相比之下,TestDirector 的角色定制和权限定制比 TestManager 和 QACenter 更详细、粒度更小。此外,TestDirector 还支持用户定义项目属性以及电子邮件通知的触发规则。

结论和未来研究工作 测试管理工具对于大型测试至关重要。本文分析了一个成功的测试管理工具所应具有的核心特性并建立了一个评估框架。通过对目前市场上主流产品的实例分析,显示该框架能够全面地展示工具的能力。这样的

研究对于选择测试管理工具非常有益,同时也有益于测试管理工具的开发。

我们未来的研究工作包括:1)进一步使用可度量属性强化评估特性;2)开发定量评估的度量单位;3)对更多的实例进行调研,根据实验结果进一步完善本文提出的框架。

参考文献

- 1 Baetjer H Jr. Software As Capital: And Economic Perspective on Software Engineering. IEEE Computer Society Press, 1997
- 2 Davis G. Managing the Test Process. In: Proc. of Intl. Conf. on Software Methods and Tools, 2000. 119~126
- 3 Hefner R H. Collaborative Test Management. In: Proc. of the 26th Annual NASA Goddard Software Engineering Workshop, 2001
- 4 Liu L, Robson D J. SEMST-A Support Environment for the Management of Software Testing. In: Proc. of the Second Symposium on Assessment of Quality Software Development Tools, 1992. 11~20
- 5 Michael J B, Bossuyt B J, Snyder B B. Metrics for Measuring the Effectiveness of Software-Testing Tools. In: Proc. of ISSRE 2002, 2002
- 6 Ohtera H, Yamada S. Optimal Allocation and Control Problems for Software-Testing Resources. IEEE Transactions on Reliability, 1990, 39(2)
- 7 Poston R M, Sexton M P. Evaluating and Selecting Testing Tools. IEEE Software, 1992, 9(3): 33~42
- 8 Pfleeger S L. Software Engineering Theory and Practice. Prentice Hall, 1998
- 9 Yau S S, Kishimoto Z. A Method for Revalidation Modified Programs in the Maintenance Phase. In: Proc. of IEEE COMPSAC, 1987. 272~277
- 10 Youngblut C, Brykczynski B. An Examination of Selected Software Testing Tools, 1992; [IDA Paper P-2769]. Inst. For Defense Analysis, Alexandria, Va., Dec. 1992
- 11 Youngblut C, Brykczynski B. An Examination of Selected Software Testing Tools, 1993; [IDA Paper P-2925]. Inst. For Defense Analysis, Alexandria, Va., Oct. 1993
- 12 Compuware Corporation. Available at: <http://www.compuware.com>
- 13 Mercury Interactive. Available at: <http://www-heva.mercuryinteractive.com>
- 14 Rational Software Corporation. Available at: <http://www.rational.com>

(上接第3页)

- 7 Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: Mobile Computing, Kluwer Academic Publishers, 1996, 353
- 8 Perevalov E, Blum R. Delay limited capacity of ad hoc networks; asymptotically optimal transmission and relaying strategy. In: IEEE INFOCOM'03, 2003, 2: 1575~1582
- 9 Gamal A E, Mammen J, Prabhakar B, et al. Throughput-delay trade-off in wireless networks. IEEE INFOCOM'04, Hong Kong, China, 2004
- 10 Dousse P T O, Hasler M. Connectivity in ad-hoc and hybrid networks. IEEE INFOCOM'02, 2002
- 11 Liu B, Liu Z, Towsley D. On the capacity of hybrid wireless networks. In: IEEE INFOCOM'03, 2003, 2: 1543~1552
- 12 Kozat U C, Tassiulas L. Throughput capacity of random ad hoc networks with infrastructure support. In: ACM MobiCom'03, San Diego, CA, 2003. 55~65
- 13 Yi S, Pei Y, Kalyanaraman S. On the capacity improvement of ad hoc wireless networks using directional antennas. In: ACM MobiHoc'03, 2003. 108~116
- 14 Peraki C, Servetto S D. On the maximum stable throughput problem in random networks with directional antennas. ACM MobiCom'03, 2003
- 15 Negi R, Rajeswaran A. Capacity of power constrained ad-hoc network. IEEE INFOCOM'04, Hong Kong, China, 2004
- 16 Zhang H, Hou J. Capacity of wireless ad hoc networks under ultra wide band with power constraint. IEEE INFOCOM'05, 2005
- 17 Dana A, Hassibi B. Power bandwidth trade-off in sensory and ad-hoc wireless networks. In: International Symposium on Information Theory (ISIT'04), Chicago, IL, USA, 2004
- 18 Dana A, Hassibi B. Power bandwidth trade-off in sensory and ad-hoc wireless networks. Fourth Annual Workshop on Advanced Networking, Pasadena, CA, USA, 2004
- 19 Dousse O, Thiran P. Connectivity vs capacity in dense ad hoc networks. IEEE INFOCOM'04, Hong Kong, China, 2004
- 20 Toupis S, Goldsmith A J. Large wireless networks under fading, mobility, and delay constraints. IEEE INFOCOM'04, Hong Kong, China, 2004
- 21 Xie L, Kumar P R. A network information theory for wireless communication: Scaling laws and optimal operation. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(5): 748~767
- 22 Gastpar M, Vetterli M. On the capacity of wireless networks: the relay case. IEEE INFOCOM'02, 2002, 3: 1577~1586
- 23 Toupis S. Capacity bounds for three classes of wireless networks; Asymmetric, cluster and hybrid. In: ACM MobiHoc'04, 2004. 133~144
- 24 Li J Y, Blake C, De Couto D S J, et al. Capacity of ad hoc wireless networks. MobiCom'01, Rome, Italy, Jul. 2001. 61~69