



无线网络的网络容量研究进展^{*}

肖雪芳¹, 雷国伟^{2,3}

(1. 厦门理工学院光电与通信工程学院 厦门 361024;

2. 北京邮电大学电子工程学院 北京 100876; 3. 集美大学理学院 厦门 361021)

摘要:综述了无线网络容量的关键技术和研究进展。首先,介绍了无线网络容量的研究背景;其次,归纳了无线网络容量理论方面的研究现状;然后,从物理层、链路层和网络层总结了提高无线网络容量的技术途径;接着,探讨了异构无线网、认知无线网的网络容量问题;最后,针对无线网络容量的重点研究方向给出了建议。

关键词:网络容量;异构;认知;网状网

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.05.021

A Survey of Network Capacity in Wireless Network

Xiao Xuefang¹, Lei Guowei^{2,3}

(1. School of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Key techniques of network capacity in wireless network and the state-of-art of this research were surveyed. Firstly, the background of network capacity in wireless network was introduced. Secondly, the theories of network capacity in wireless network were generalized. After that, existing techniques of improving network capacity in wireless network were summarized from physical layer, link layer and network layer. Then, research problems of network capacity in heterogeneous wireless network and cognitive wireless network were discussed. Finally, suggestions on future research topics in this field were given.

Key words: network capacity, heterogeneous, cognitive, mesh network

1 引言

随着无线通信网络用户的日益庞大,各种无线接入技术也飞速发展。特别是随着“三网融合”概念的提出,更加速了多种异构网络的泛在融合。然而以频谱为代表的无线网络资源则显得日趋紧张,因此,一方面必须对无线网络资源进行整体规划、智能管理、优化决策和调度,以提高网络资源的合理利用;另一方面,采用自适应

调制(AM)技术、多天线(MIMO)技术、认知无线电(CR)技术等提高无线频谱利用的有效性,以提高无线通信系统的信道容量。然而,传统无线通信的容量研究主要是建立在特定点对点信道下寻求达到最佳理论性能界限或信道容量。基于点对点通信的香农定理在无线蜂窝通信系统中的应用获得了巨大的成功,但是在高度网络化的通信系统中面临巨大的困难。如何将香农信息理论推广至多个无线节点组成的复杂的通信网络领域,解决多个

^{*} 福建省教育厅 A 类基金资助项目(No.JA11232),福建省高等院校学生创新科研基金资助项目(No.Z81144)

发送者、多个接收者之间的相互作用(如干扰、合作等)问题,从而指导无线网络的优化设计,一直是网络信息论研究者努力的目标。

目前,对无线网络容量的研究已涌现了大量开拓性的成果^[1-10]。Gupta 和 Kumar 针对自组织(Ad Hoc)无线网络下的网络容量进行分析,提出了4种网络模型情况下各自所能达到的容量界^[1],即随着网络节点数的增加,平均每个节点所能获得的吞吐量则以标度率(scaling law)下降。该文献成为无线网络容量领域的经典论文,从而拉开了无线网络容量研究的序幕。但该文献讨论的对象仅限于独立同分布的静态节点,另外节点的功率、网络流量模式等也比较单一。之后,Grossglauser 等人研究了随机网络节点运动情况下,采用多用户分集和数据分组转发,理论上可以使源一宿之间的平均吞吐量不再受节点数目变化的影响^[2]。但该结果是在信道状态信息完全已知的前提下获得的,如果节点运动速度太快,则无法获取网络的拓扑信息,由此带来信道估计的困难势必影响网络的吞吐量^[3]。另外,以上结果还没有考虑到路径损耗、节点功率及网络时延等因素。参考文献[4]在研究网络传输容量时结合了路径损耗和吸收衰减的因素。参考文献[5,6]讨论了节点的传输功率以及功率控制给网络容量带来的影响。参考文献[7,8]在研究网络吞吐量时考虑了数据分组时延的因素。总之,这些文献都从理论上探讨了无线网络的容量界和不同参数对网络容量的影响,但由于实际无线网络的复杂性,因此还难以给出无线网络容量的一般表达形式。参考文献[9,10]尝试着以二维栅格网和环型网为例,给出了规则拓扑网络的容量闭式解,为一般网络的容量研究提供了借鉴。伴随着网络容量理论研究的同时,一些提高网络容量的优化方法和技术也相继提出^[11-31]。如采用基础设施^[11-13]、多信道多射频^[14,15]、智能天线技术^[16,17]、MIMO 技术^[18-20]、超宽带技术^[21,22]、认知无线电技术^[23-25]、网络编码与协作

传输^[26-29]、广播和多播^[30]策略、多分组多数据流^[31,32]、路由策略^[33]等。

无论是从理论还是从技术上来讲,对自组织网的容量研究已趋于成熟。但是,在无线通信技术飞速发展的今天,涌现出了多种类型的无线网络,如:无线局域网(WLAN)、WiMAX、Wi-Fi、无线个域网(WPAN)、无线网状网(WMN)、无线传感器网(WSN)等。虽然对这些网络的容量也有相关的研究,如 WMN 的网络容量^[34,35]和 WSN 的网络容量^[36],但这些研究无疑还是在自组织网的理论基础上进行的。目前,虽然有相关综述性的文章,但主要是针对某一类型如自组织网^[37]或网状网等进行讨论^[38]。在网络泛在的大趋势下,采用不同组网技术的异构认知与网络融合将是未来网络容量研究的重点和关键。相关的研究还不多,本文正是在此背景下深入探讨无线网络容量的发展和研究方向。下面先从理论角度和技术角度分别进行阐述。

2 理论研究

由于无线网络中有关网络容量的概念比较繁杂,为此归纳了几种典型的网络容量概念^[1-4,39-45],见表1。

目前研究频率最高的主要是围绕传送容量^[1-4,39-40]和平均节点吞吐量展开的^[41,42]。根据表1中的传送容量定义,当平均空间传送距离为1m时,传送容量即退化成吞吐量容量。参考文献[1]首先介绍了两种类型网络:扩张型网络(extended network)和密度型网络(dense network),然后主要就二维平面密度型网络研究了4种情况下的平均节点网络容量界,见表2。

表2 平面密度型网络的容量界

	协议模型	物理模型
随机网络	$\Theta(1/(n \ln n)^{1/2})$	$O(1/n^{1/2})$ 和 $\Omega(1/(n \ln n)^{1/2})$
任意网络	$\Theta(1/n^{1/2})$	$O(1/(n \ln n)^{1/\alpha})$ 和 $\Omega(1/n^{1/2})$

表1 几种典型的网络容量概念

类型	概念	公式
传输容量	提出只考虑一个系统,在中断约束下,单位面积内网络的频谱资源利用率,即最大信息传输速率	$T_m C = b \bar{\lambda}_i (1 - \varepsilon_i)$,其中 b 为成功用户获得的平均数据率, $\bar{\lambda}_i$ 为满足中断要求的最大空间密度, ε_i 为中断限制
频谱共享传输容量	多个系统共享频谱的情况下的传输容量	表达式同 $T_m C$,但 λ_i 的意义为满足所有系统中断率的密度
传送容量	考虑网络规模与网络容量的关系,有空间距离的含义(bit-meter/second)	$T_s C \propto f(n)$,其中 n 为节点数, f 为Knuth函数表示法
吞吐量容量	网络中节点所能获得的最大吞吐量	$T_b C = C/T$,其中 C 为源发出的数据分组大小, T 为数据分组到达目的所历经的时间
平均节点吞吐量	平均分配在每个网络节点上的吞吐量	$T_b C/N$,其中 N 为节点总数



表2中采用了Knuth函数表示法, O 表示渐进上限, Ω 表示渐进下限, Θ 表示上下同时逼近。相比传送容量而言,传输容量以新的角度研究网络容量^[43]。其核心思想是基于网络中信干比的统计特性,即Ad Hoc网络中的总干扰信号功率服从稳态分布^[44]。可以看到,传输容量和传送容量还是有一定联系的。根据表中传输容量的概念,其值与传输半径的关系为 $\Theta(r^{-2})$,另外传输范围和节点数的关系又为 $r^2 \propto 1/n$,因此传送容量就与 λr 有关,即规律为 $\Theta(1/n^{1/2})$ 。由于传输容量能够反映在数据率、带宽、中断概率一定的情况下,无线网络能够支持的用户数,因此,在分析Ad Hoc网络时传输能量也被看作一种重要的性能指标。除了表2中介绍的之外,还有一些传输容量的变种^[45,46],限于篇幅不进行赘述。

虽然Ad Hoc网络容量的理论分析已取得了大量的成果,但由于mesh网和Ad Hoc网之间的差别,其研究结果可能无法直接应用于mesh网。比如,mesh网中可能同时存在固定的Ad Hoc节点,又存在移动的Ad Hoc节点,因此参考文献[1]采用的网络结构与mesh网络结构并不匹配。参考文献[34]从mesh的链式拓扑推广到任意拓扑,指出平均每个节点的吞吐量随节点数以 $O(1/n)$ 下降。随后,参考文献[35]发现在节点到网关这一段,给节点增加发射功率级可使吞吐量改善为 $O(1/\delta n)$ 。特别在多网关情况下,可使效果更为明显。总之,对mesh网络来说,影响网络容量的因素很多,网络拓扑、网络流量类型、网络节点密度、节点功率、节点移动性等,在容量估计与优化中都必须考虑^[38]。因此,有很多文献就mesh容量提出了跨层优化的思想^[47,48]。

3 技术研究

尽管Gupta和Kumar从理论上给出了无线网络容量所能达到的性能界,人们还是努力通过各种技术提高网络的吞吐容量,分别有如下一些技术手段。

(1) 物理模型下使用渗透理论

Franceschetti等人提出^[49],在物理模型下,使用渗透(percolation)理论设计路由策略,由一些节点构成类似“高速公路”的跨越源一宿之间的所有节点。该“高速公路”就像一个渗透的管道,源节点把数据传送到附近处于管道内的节点,再经由管道以高数据率送达离宿节点最近的管道内的节点,最后传送给宿节点。理论证明,无论是随机网络还是任意网络,都可以得到更为紧密的容量上下界值,

即单个容量的界值是 $\Theta(1/n^{1/2})$ 的速率。

(2) 采用固定基础设施

由基础设施支持的Ad Hoc网相继被提出^[11-13],其中参考文献[13]提出混合(hybrid)自组织网的概念,网中Ad Hoc节点独立同分布且具有相同的发射功率,基站规则分布且把区域分成许多六边形蜂窝状。基站之间的通信采用高速宽带有线网连接。加入基础设施的好处是使源一宿之间的跳数保持不变,而纯Ad Hoc网的源一宿之间的跳数则随节点数以 $1/n^{1/2}$ 的关系增长。可以说采用固定基础设施的实质是以减少跳数的增加改善网络容量。

(3) 采用多信道多射频接口

参考文献[1]研究的是单信道单射频接口的情形,对此参考文献[14,15]讨论了多信道多接口的网络容量。在无线网络中采用多信道技术,让相邻链路使用不同信道,这样就可以减少因干扰引起的信道容量衰减。但是在多信道无线网络环境下,若每个节点只有单一射频接口,那么每个射频接口和不同节点进行通信时就要不停地切换信道。这样会造成网络拓扑的时刻变化,切换时间带来的时延也会影响网络的吞吐量。因此,使用多射频、多信道的无线网络,可使每个射频接口具有独立的MAC和物理层特性,可以通过路由控制协调不同节点间的通信,从而达到网络容量的优化。

(4) 利用智能天线技术

Yi等人通过讨论在任意网络中使用智能天线^[16]发现:若发射端天线使用的波束宽度为 α ,接收端使用的波束宽度为 β ,则网络容量可获得 $2\pi\sqrt{\alpha\beta}$ 的增益。而在随机网络中这个结果可以达到 $4\pi^2/\alpha\beta$ 。文中还特别提出,如果波束宽度 $\alpha\beta$ 减小的程度与 $1/\sqrt{n}$ 一样快,则网络中的吞吐量可以不受节点数的影响。参考文献[17]则具体从硬件的角度讨论天线参数如天线增益、波束宽度等对网络容量的影响。

(5) 利用MIMO技术

为了考察MIMO技术对Ad Hoc网络容量的影响,参考文献[18]介绍了容量界域(capacity region)和数据率界域(rate region)的概念。通过比较发现,采用MIMO技术对Ad Hoc网络容量的增益和对点对点通信系统的增益贡献是相似的。参考文献[19]提出在网络中有多个发射节点和单个接收节点,每个发射节点只使用一根天线发射,而接收节点同时使用多根天线分别接收来自不同发射天线的信号并且译码,这些天线使用的都是统计独立信道。参考

文献[20]针对 mesh 网的传输配置问题,研究当节点的物理层使用 MIMO 技术时,在同样的空间传输范围内,发射天线的数目对于网络容量的影响。

(6) 采用超宽带技术

Negi 等人首先将超宽带 (UWB) 技术应用于 Ad Hoc 网络容量的优化^[21]。文中假定网络节点的传输功率均为 W , 在带宽 $B \rightarrow \infty$ 的极限情况下, 推导出: 节点吞吐容量的上界为 $O((n \ln n)^{(\alpha-1)/2})$, 下界为 $\Omega\left(\frac{n^{(\alpha-1)/2}}{(\ln n)^{(\alpha+1)/2}}\right)$ 。在该基础上, Honghai 等人采用渗透理论, 将其上下界减少了 $\Theta(n^{(\alpha-1)/2})$ 的数量级^[22]。

(7) 采用认知无线电技术

认知无线电被视为解决频谱覆盖问题的充满前景的方法之一, 它采用机会通信的思想, 在尽可能不影响主用户通信的前提下, 为从用户开辟可用的频谱空间。参考文献[23]引入了辅助网络 ξ 、 α 分析网络容量上下界, 推导出协议模型和物理模型下的一般结果。同时指出, 参考文献[1]的单信道、单射频是 CRN 的特例。参考文献[24]在 mesh 网中采用覆盖认知无线电模型, 基于 Jovicic 和 Viswanath 的范例^[25], 在给定干扰区域内就能够并发传输。对文中讨论的链式拓扑, 增益可达 33%。文中还给了一个复杂的拓扑类型, 得到的增益更高。

(8) 利用网络编码

网络编码的概念是由 Ahlswede 等人率先引入, 参考文献[26]以蝴蝶网络的研究为例, 指出通过网络编码, 中间节点对收到的信息进行编解码, 可以达到多播路由传输的最大流界。Liu 等人研究了网络编码对无线网络容量的贡献^[27], 并指出: 在随机网络的物理模型或协议模型下, 这种改善最多只有常数倍的提高; 而在任意网络的物理模型或协议模型下, 可获得最大 $O(\ln n)$ 数量级的容量增益。不过, 文中也提出了如果不考虑物理层, 很难从根本上解决参考文献[1]的扩容问题。对此, 出现了物理层网络编码 (PLNC) 的新概念^[28], 即允许节点接收干扰的无线信号, 再由物理层处理这些信号。参考文献[29]从 3 种编码机制讨论了大规模无线网络的吞吐容量。即: 多点到多点编码 (MPPC)、基于 MPPC 的网络编码、基于 MPPC 的物理层网络编码。为了比较前 3 种机制的容量增益, 引入了尺度因子 ω 。结果发现, 当 ω 增大到一定程度, MPPC 比 PPC 更能改善网络容量的标度率。另一方面, 在尺度因子 ω 、传输功率、噪声和路径传播损耗的多因素下, 基于 PLNC 的容

量增益在二维网络接近 2, 而在一维网络的容量增益可超过 2。

(9) 广播、多播对网络容量的影响

参考文献[30]对多播容量问题进行了阐述。假设有 n 个无线节点随机地分布在正方形区域内, 所有节点具有相同的传输半径和干扰半径 $R, R > r$, 每个无线节点均可以通过一个共同的无线信道以 W bit/s 的速率传输或接收数据。证明指出, 如果有 n 个多播数据流, 且每个数据流都有 k 个接收对象, 那么当 $k = O(n/\ln n)$ 时, 每个数据流的多播容量为 $\Theta\left(\sqrt{\frac{1}{n \ln n} \cdot \frac{W}{\sqrt{k}}}\right)$; 当 $k = \Omega(n/\ln n)$ 时, 每个数据流的多播流量为 $\Theta(W/n)$ 。

(10) 采用多分组、多数据流的方法

无线网络中的节点具有同时接收多个用户数据分组并对它们进行有效分离的能力, 而不是对于多个同时到来的数据分组只能当作冲突全部丢弃。多分组接收可有效地提高整个网络的吞吐量和减少数据分组的传送等待时延^[31, 32]。

(11) 采用路由策略

参考文献[33]描述了一个移动 Ad Hoc 网的容量界域, 引入了联合调度和路由方法, 把问题映射为关联接触图法上的多流问题。通过关联接触图法, 提供了一个精确刻画容量界域的一般方法。该方法可以把分析推广到各向异性移动模式的同构节点。

4 泛在网的容量研究

由于通信网络朝着高速化、宽带化、泛在化的方向发展, 涌现出了各种网络接入技术, 使得未来无线网络的异构性和融合性更加突出。由于多种网络的并存以及频谱资源的日趋紧张, 如何加强网络间的融合、提高网络智能化、保持网络的顽健性、保证用户的 QoS 要求等, 都是新型无线网络技术需要面对的问题。而这些技术无疑都与网络容量的研究密不可分, 因此笔者认为, 这些都将成为未来网络容量研究的重要领域。

(1) 异构网络的容量

网络的异构性比较繁多, 直接体现在网络的各个层面, 例如网络的频谱、网络的功率和调制方式、网络终端以及网络的管理等方面。

目前关于异构无线网络容量的文献还不多, 且研究得还不够深入。参考文献[50]提出在同构网络中加入帮助节



点(helping node)而得到的双层网络模型。通过分析发现,若在带宽等方面赋予帮助网络节点更强的性能,就能获得比同构网络更高的吞吐容量。参考文献[12]讨论了混合网络的容量,即无线网络中与基站通信进行有线链接,可以通过功率控制获得比纯无线网络更高的容量。这种网络实质就是传统蜂窝网和纯 Ad Hoc 网的融合^[13]。参考文献[51]在异构网络中采用了认知路由矩阵以提高网络容量。参考文献[52]研究了 UMTS、WiMAX 及 Wi-Fi 等多种无线网络并存的情况下,交通车辆之间采用并行多路径传输带来的吞吐量(也称流量)情况。参考文献[53]研究了一种 mesh 异构网试验平台,对其网络性能做了尝试性的研究,但并没有涉及到网络流量或者吞吐量方面的内容。且其对象也仅限于对特例进行仿真,并没有做一般性的推广。

(2) 认知网络的容量

认知网络的概念源于认知无线电,但技术上还是存在很大差别。认知无线电一般只考虑物理层和 MAC 层,而认知无线网络则是一种具有认知能力的网络。它包含频谱在内的网络信息感知、智能决策、资源分配机制以及网络重构等方面^[54]。例如,在主网络节点和次网络节点工作在相同频段的情况下,准许次网络节点(也称认知节点)调整传输功率来保证主网络节点的服务质量。频谱管理包括频谱感知和频谱分配。认知节点不断感知未被主网络节点使用的频带(也称频谱空洞),寻机使用频谱进行通信。路由选择是指节点加入网络或离开网络导致网络拓扑的变化,这就需要网络具有邻节点发现和拓扑重构的能力。同时在未来的无线网络中,认知网络还应具备监测更多参数的能力,包括周围(协同或竞争)无线设备的其他共享资源、配置、时延、能耗等。在认知原理方面,认知网络可以采用博弈理论、图着色、多属性判决等多种智能方法。

认知网络容量的研究一般围绕网络中,同时存在主用户节点和次用户节点时,如何采用高效的频谱管理^[55]、路由策略^[56]等技术,以提高网络容量。而参考文献[57]推出了一种由认知节点以多跳方式组成的智能网络。该网络基于路由选择与功率分配的跨层优化,采用遗传算法等优化分析网络吞吐量,以此性能逼近网络容量上界。参考文献[58]研究了具有认知能力的异构无线网络内的多射频协作性优化,但对该网络的容量研究还不够深入。

5 结束语

目前看来,无论在理论上或者在技术上,无线网络容量的研究已取得了大量的成果。不过,这个领域仍然存在新的问题,也面临着新的挑战,主要有以下几点。

(1) 网络容量定义的统一

无线网络容量的定义繁多,其主流的定义可见表 1。如前所述,虽然有些网络容量概念在某种程度上具有关联性,但若不加以区别地运用则会带来麻烦。因为每种网络容量概念都有其存在的实际应用背景,要根据具体的网络形式和通信方式针对性地分析。而且,表 1 所列的网络容量定义主要基于网络层描述(如空间距离、节点密度、数据分组时延等)。倘若将物理层、链路层等综合考虑进来,对网络容量的分析会越发复杂。不过,对网络容量定义的统一化工作却有一定的理论意义,在工程上也有实用价值。

(2) 融合异构认知的跨层优化

由于异构网络的复杂性,单一地从网络层、物理层,抑或是 MAC 层都不能全面很好地分析其网络容量。因此,对异构无线网络的容量研究必须跨层、跨协议地展开。早在 2003 年,Shakkottai 等人就对跨层设计在无线网络中的应用进行了研究^[59],利用跨层设计在协议栈各层之间进行交互以实现优化。基于此,笔者提出跨层映射的思想,为未来的工作提供参考:从物理层出发,综合不同网络的频谱、功率、调制方式等;从网络层出发,考虑不同网络的网络特性、网络参数、网络拓扑等差异,建立多属性决策表,利用多属性判决机制构建异构网络的容量代价函数,进而为无线接入的网络切换提供依据。对异构无线网络来说,垂直切换的目标和难度远高于水平切换^[60],所以平衡异构网络通信中的有效性和可靠性的矛盾显得非常关键。

参考文献

- 1 Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2):388~404
- 2 Grossglauser M, David N C. Mobility increases the capacity of Ad Hoc wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(4):477~486
- 3 Jafar S A. Too much mobility limits the capacity of wireless Ad Hoc networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(11):3954~3965

- 4 Xie L 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
- 5 Behzad A, Rubin I. High transmission power increases the capacity of Ad Hoc wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(1):156~165
- 6 Sun Q, Zeng X W, Rasool U R, *et al.* The capacity of wireless Ad Hoc networks with power control. *Proceedings of International Workshop on Cross Layer Design*, Shanghai, China, Sep 2007: 20~24
- 7 Toupmpis S, Goldsmith A J. Large wireless networks under fading, mobility and delay constraints. *Proceedings of Info-Com2004*, Austria, Mar 2004:609~619
- 8 Bansal N, Liu Z. Capacity, delay and mobility in wireless Ad Hoc networks. *Proceedings of InfoCom2003*, USA, April 2003: 1553~1563
- 9 Mergen G, Tong L. Stability and capacity of regular wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(6): 1938~1953
- 10 Liu X W, Haenggi M. Throughput analysis of fading sensor networks with regular and random topologies. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005(5):554~564
- 11 Zemlianov A, Vieceana G D. Capacity of Ad Hoc wireless networks with infrastructure support. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(3):657~667
- 12 Agarwal A, Kumar P R. Capacity bounds for Ad Hoc and hybrid wireless networks. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2004, 34(3):71~81
- 13 Liu B Y, Liu Z, Towsley D. On the capacity of hybrid wireless networks. *Proceedings of IEEE InfoCom2003*, USA, April 2003: 1543~1552
- 14 Kyasanur P, Vaidya N H. Capacity of multichannel wireless networks under the protocol model. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(2):515~527
- 15 Kodialam Murali, Nandagopal Thyaga. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks. *Proceedings of IEEE MobiCom05*, Germany, 2005:73~87
- 16 Yi S, Pei Y, Kalyanaraman S. On the capacity improvement of Ad Hoc wireless networks using directional antennas. *Proceedings of IEEE MobiHoc03*, USA, 2003:108~116
- 17 Spyropoulos A, Raghavendra C S. Capacity bounds for Ad Hoc networks using directional antennas. *Proceedings of IEEE international Conference (ICC2003)*, USA, 2003:348~352
- 18 Ye Sigen, Blum R S. On the rate regions for wireless MIMO Ad Hoc networks. *Proceedings of IEEE VTC04*, USA, Sep 2004: 1648~1652
- 19 Yu X H, Renato M, Moraes D, *et al.* Capacity of MIMO mobile wireless Ad Hoc networks. *Proceedings of 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, USA, June 2005:1053~1058
- 20 Jaafar W, Ajib W, Tabbane S. The capacity of MIMO-based wireless mesh networks. *Proceedings of IEEE ICON07*, CA, Nov 2007:259~264
- 21 Negi R, Rajeswaran A. Capacity of ultra wide band wireless Ad Hoc networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(10):3816~3824
- 22 Zhang H H, Hou J C. Capacity of wireless Ad Hoc networks under ultra wide band with power constraint. *Proceedings of IEEE InfoCom2005*, USA, Mar 2005:455~465
- 23 Shi Y, Jiang C, Hou Y T, *et al.* On capacity scaling law of cognitive radio Ad Hoc networks. *Proceedings of ICCCN 2011*, USA, Aug 2011:1~8
- 24 Pereira R C, Souza R D, Pellenz M E. Using cognitive radio for improving the capacity of wireless mesh networks. *Proceedings of IEEE VTC08*, USA, Sep 2008:1~5
- 25 Jovicic A, Viswanath P. Cognitive radio: an information-theoretic perspective. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(9): 3945~3958
- 26 Ahlswede R, Cai N, Li S-Y R, *et al.* Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204~1216
- 27 Liu J, Goeckel D, Towsley D. Bounds on the throughput gain of network coding in unicast and multicast wireless networks. *IEEE Journals on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5): 582~592
- 28 Lu K J, Fu S L, Qian Y, *et al.* On capacity of random wireless networks with physical-layer network coding. *IEEE Journals on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5): 763~772
- 29 Zhang T, Lu K J, Fu S L, *et al.* Improving the capacity of large-scale wireless networks with network-assisted coding schemes. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2012, 11(1):88~96
- 30 Li X Y. Multicast capacity of wireless Ad Hoc networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(3): 950~961
- 31 Guo M F, Wang X B, Wu M Y. On the capacity of k -MPR wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(7):3878~3886
- 32 Sadjadpour H R, Wang Z, Garcia-Luna-Aceves J J. The capacity of wireless Ad Hoc networks with multi-packet reception. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(2):600~610
- 33 Garetto M, Giaccone P, Leonardi E. On the capacity region of MANET: scheduling and routing strategy. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(4):1930~1941



- 34 Jun J, Sichitiu M L. The nominal capacity of wireless mesh network. *IEEE Wireless Communications*, 2003,10(5):8~14
- 35 Pathak P H, Dutta R. Impact of power control capacity on capacity of large scale wireless mesh networks. *Proceedings of IEEE ANTS09, USA*, Dec 2009:1~3
- 36 Song M, He B. Capacity analysis for flat and clustered wireless sensor networks. *Proceedings of IEEE WASA07, Norfolk*, 2007: 249~253
- 37 戴沁芸, 胡修林, 苏钢等. 无线 Ad Hoc 网络容量的研究综述. *计算机科学*, 2006, 33(4):1~38
- 38 杨盘隆, 陈贵海. 无线网状网容量分析与优化理论研究. *软件学报*, 2008, 19(3):687~701
- 39 Jovicic A, Viswanath P, Kulkarni S R. Upper bounds to transport capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(11):2555~2565
- 40 Xue F, Xie L L, Kumar P R. The transport capacity of wireless networks over fading channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(3):834~847
- 41 Hwang Y J, Kim S L. The capacity of random wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12):4968~4975
- 42 Dousse O, Franceschetti M, Thiran P. On the throughput scaling of wireless relay networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6):2756~2761
- 43 Weber S P, Yang X Y, Andrews J G, *et al.* Transmission capacity of wireless Ad Hoc networks with outage constraints. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12):4091~4102
- 44 Ilow J, Hatzinakos D. Analytic alpha-stable noise modeling in a poisson field of interferers or scatterers. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(6):1601~1611
- 45 Lee J, Andrews J G, Hong D. Spectrum-sharing transmission capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(9):3053~3063
- 46 Lee J, Lim S, Andrews J G. Achievable transmission capacity of second system in cognitive radio networks. *Proceedings of IEEE ICC2010, USA*, 2010(5):1~5
- 47 Huang S Q, Zheng Q L. Research of capacity optimizing model on wireless mesh networks. *Proceedings of IEEE ICCSIT 2009, Guangzhou, China*, 2009:569~572
- 48 Ramamurthi V, Reaz A S, Mukherjee B. Optimal capacity allocation in wireless mesh networks. *Proceedings of IEEE GlobeCom2008, CA*, 2008:1~5
- 49 Franceschetti M, Dousse O, Tse N C D, *et al.* Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(3):1009~1018
- 50 Li P, Fang Y G. The capacity of heterogeneous wireless networks. *Proceedings of IEEE InfoCom2010, USA*, 2010:1~9
- 51 Zhong Z, Wei T. Cognitive routing metric with improving capacity(CRM-IC) for heterogeneous Ad Hoc network. *Proceedings of IEEE ICINA 2010, Chengdu, China*, 2010:271~274
- 52 Cao Y L, Xu C Q, Guan J F, *et al.* Relational analysis based concurrent multipath transfer over heterogeneous vehicular networks. *International Journal of Computer Science Issue*, 2012, 9(5):1~10
- 53 You L Z, Dong C, Chen G H, *et al.* FHMesh: a flexible heterogeneous mesh networking platform. *Proceedings of IEEE 6th MSN 2010, Nanjing, China*, 2010:189~192
- 54 魏急波, 王杉, 赵海涛. 认知无线网络: 关键技术与研究现状. *通信学报*, 2011, 32(11):147~158
- 55 Kim S, Park T, Choi W, *et al.* The capacity of cognitive Ad Hoc networks with carrier sensing errors. *Proceedings of IEEE 6th CROWNCOM, South Korea*, 2011:380~384
- 56 Huang W T, Wang X B. Capacity scaling of general cognitive networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(5):1501~1513
- 57 杨双懋, 郭伟, 唐伟. 一种最大化网络吞吐量的认知无线 Ad Hoc 网络跨层优化算法. *计算机学报*, 2012, 35(3):491~50
- 58 Choi Y, Lee Y, Cioffi J M. Optimization of cooperative inter-operability in heterogeneous networks with cognitive ability. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(11):1178~1180
- 59 Shakkottai S, Rappaport T S, Karlsson P C. Cross-layer design for wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(10):74~80
- 60 糜正琨. 认知网络与网络综合. *中国新通信*, 2009(6):5~10

[作者简介]



肖雪芳, 女, 博士, 厦门理工学院副教授, 主要研究方向为光电检测与通信电路设计。



雷国伟, 男, 博士, 北京邮电大学/集美大学讲师, 主要研究方向为无线网络与多天线技术。

(收稿日期: 2013-04-01)