

## 多小区无线局域网的系统吞吐率估计算法

凌翔 阳坤\* 严少虎 吴诗其

(电子科技大学抗干扰通信国防重点实验室 成都 610054)

\*(香港大学电机电子工程系 香港)

**摘要:** 在多小区无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)中, 由于存在小区间接入访问点同频干扰, 以及小区内同频用户干扰, 其系统性能与单小区网络具有很大不同。本文提出了支持多种用户传输速率共存、支持用户非均匀分布的多小区 WLAN 系统吞吐率估计算法。通过对多小区 WLAN 中接入访问点的布置、信道的配置进行仿真, 结果表明即使在存在小区内同频干扰的情况下, 估计算法也能得到满意的吞吐率估计结果。

**关键词:** 无线局域网, IEEE 802.11, 系统吞吐率, 估计算法

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1493-05

## The System Throughput Estimation Method for Multi-cell WLANs

Ling Xiang Yeung Kwan\* Yan Shao-hu Wu Shi-qi

(SCIE, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

\*(Department of EEE, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract** In multi-cell Wireless Local Area Networks (WLAN), co-channel interference between access points, and interference between co-channel users located in neighbored cells are existed, which lead the system performance different from the situation in a single-cell WLAN. A system throughput estimation method is proposed. Three important features of this method are that co-channel overlapping is allowed, hybrid data rates are allowed, and non-uniform distribution of users is allowed. The simulation results on the access point placement and the channel assignment show that the estimation method meets system design.

**Key words** Wireless local area networks, IEEE 802.11, System throughput, Estimation method

### 1 引言

在 IEEE 802.11 系列标准及 HIPERLAN 等标准的规范下, 无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)近几年得到了空前发展。随着 802.11 无线传输设备成本的下降、无线传输速率的提高、以及便携式终端的普及, 越来越多的园区、大楼开始采用 WLAN 实现大规模无线覆盖, 组建多小区 WLAN。在多小区 WLAN 中, 为了保证无缝覆盖和获得更高的系统吞吐率, 大量的接入访问点(Access Point, AP)将被放置, 每个 AP 覆盖区对应为一个小区。由于信道资源有限和障碍物环境的复杂性, 通常部分小区间存在同频交叠情况(即两个 AP 被分配了相同的信道频带, 且其覆盖区存在交叠)。多小区网络的系统性能研究比无同频交叠的单一小区覆盖复杂许多。对于网络规划者而言, 多小区 WLAN 的吞吐率性能将严重影响网络规划方案。因此如何有效地估计系统吞吐率, 是多小区 WLAN 设计迫切需要解决的关键问题。

目前对于单小区系统吞吐率的研究较为成熟。Bianchi 分析了 IEEE 802.11 分布式协调控制(Distributed Coordination Function, DCF)机制下的系统性能<sup>[1]</sup>; Jun 分析了数据速率、分组长度对理论最大吞吐率的影响<sup>[2]</sup>; Xiao 证明了不同数据速率条件下, 系统吞吐率存在理论上限<sup>[3]</sup>; Kamerman 分析了帧头开销、信令开销对吞吐率的影响<sup>[4]</sup>; Cali 讨论了用户数量和分组长度对系统容量的影响<sup>[5]</sup>; Ziouva 分析了用户数量对系统吞吐率的影响<sup>[6]</sup>; Zahedi 讨论了单小区中隐蔽终端和捕获效应的影响<sup>[7]</sup>。以上文献都只涉及单小区 WLAN 系统性能。在多小区 WLAN 研究方面, Huang 分析了多小区网络中隐蔽终端的干扰问题, 但作者只简单地假设隐蔽终端干扰为 Bernoulli 随机到达, 未分析实际环境多小区之间的相互影响状况<sup>[8]</sup>; Takaya 在实验中观察了两个小区间的干扰现象<sup>[9]</sup>; Kamerman 讨论了多小区的频率资源复用和载波侦听门限的影响<sup>[10]</sup>。目前对于多小区 WLAN 系统性能的估计还没有有效的解决算法。

本文提出了多小区 WLAN 的系统吞吐率估计算法,即使网络环境存在小小区间同频交叠时,该算法仍然可以得到令人满意的估计结果,同时此算法支持多种用户传输速率共存,支持用户非均匀分布。

## 2 系统吞吐率估计算法

802.11 协议系列定义了多种网络类型,目前 802.11b DSSS 网络应用广泛,支持的传输速率根据接收灵敏度门限(RXThresh)的不同,分别支持 1, 2, 5.5 和 11Mbps;对于 DSSS 网络,ETSI 规定了 13 个可选信道,FCC 规定了 11 个可选信道。相邻信道存在频谱交叠,因此为了避免频谱交叠干扰,一般网络规划中只选用 3 个无交叠信道<sup>[11]</sup>。此外,为了避免隐终端引起的冲突,RTS 与 CTS 握手信令已被大量采用。

采用多小区 WLAN 覆盖园区、大楼时,为了得到较高的系统吞吐率,一般会放置大量的 AP,某些 AP 可能会被配置相同的信道频带。每个 AP 覆盖区对应为一个小区。由于园区、大楼内存在建筑物或障碍物的阻隔,小区一般为非规则形状,为了实现无缝覆盖,小区交叠在所难免。WLAN 在进行规划设计时,应尽量避免同频小区交叠,但实际应用环境的复杂性使得小区同频交叠或多或少地存在。进行多小区系统吞吐率估计必须考虑同频交叠。

文献[1]详细分析了单小区系统性能,从中可知,小区中某时刻隙有用户分组发送的概率  $P_{tr}$  和已发送分组中成功传输的概率  $P_s$  分别为

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \tag{1}$$

$$P_s = n\tau(1 - \tau)^{n-1} / P_{tr} \tag{2}$$

其中  $n$  为小区用户总数; $\tau$  为某一用户发送分组的概率。

系统中信道的使用状态包括 3 种情况:当所有用户都未发送数据时,信道空闲;当只有一个用户占用信道,则成功传输;当有一个以上用户同时抢占信道,则发生碰撞。本文中定义信道空闲概率  $P_{idle}$ 、信道成功传输概率  $P_{succ}$ 、信道碰撞概率  $P_{coll}$  分别为

$$P_{idle} = 1 - P_{tr} \tag{3}$$

$$P_{succ} = P_{tr} P_s \tag{4}$$

$$P_{coll} = P_{tr}(1 - P_s) \tag{5}$$

在采用 RTS/CTS 的 WLAN 中,假设每个用户业务量饱满(即任意时刻发送队列都有待发数据),那么信道空闲则是由用户随机回退引起,每个时隙回退计数器减一,每个时隙  $T_{slot} = 20 \mu s$ ;见图 1(a)。当移动终端  $MT_i$  成功获得信道时,如图 1(b),此次数据传输的信道占用时间  $T_i$  为

$$T_i = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{preamble} + T_{MPDU-i} + T_{DIFS} + 3T_{SIFS} \tag{6}$$

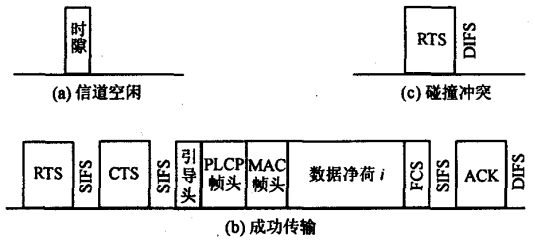


图 1 信道使用的三种状态

$$T_{MPDU-i} = \frac{L_{PLCPheader}}{1Mbps} + \frac{L_{MACheader} + L_{data-i} + L_{FCS}}{DataRate_i} \tag{7}$$

其中  $T_{DIFS}$ ,  $T_{SIFS}$  为帧内间隔,  $T_{RTS}$ ,  $T_{CTS}$ ,  $T_{ACK}$  为握手信令的信道占用时长,  $T_{preamble}$  为引导头的信道占用时长,  $T_{MPDU-i}$  为用户  $i$  数据分组的信道占用时长;  $L_{PLCPheader}$ ,  $L_{MACheader}$ ,  $L_{FCS}$  为数据分组帧头、帧尾开销,  $L_{data-i}$  为数据净荷长度;  $DataRate_i$  为用户  $i$  的传输速率,根据用户接收信号强度的不同,传输速率分别为 11, 5.5, 2 或 1Mbps。

当信道发生冲突时,用户的 RTS 帧不能被应答,信道冲突时长  $T_{coll}$  见图 1(c):

$$T_{coll} = T_{RTS} + T_{DIFS} \tag{8}$$

相关时序参数见表 1。

表 1 802.11b 时序参数

$T_{slot}$	$T_{DIFS}$	$T_{SIFS}$	$T_{RTS}$	$T_{CTS}$
20 $\mu s$	50 $\mu s$	10 $\mu s$	352 $\mu s$	304 $\mu s$
$T_{ACK}$	$T_{preamble}$	$L_{PLCPheader}$	$L_{MACheader} + L_{FCS}$	
304 $\mu s$	144 $\mu s$	48bit	34byte	

高层分组长度一定时,低传输速率用户将比高传输速率用户需要更长的信道占用时间来完成分组传输<sup>[12]</sup>。例如在 UDP 上承载 CBR 业务时,如果典型的 CBR 分组长度为 1500byte,则 5.5Mbps, 2Mbps, 1Mbps 用户的信道占用时间分别是 11Mbps 用户的 1.48, 3.16, 5.80。

同频小区间的相对位置关系可以分为 3 类,如图 2:

(1) 交叠小区 图 2(a)显示了两个交叠小区,阴影范围表示接收区,即接收信号功率强度大于接收灵敏度门限(RXThresh)的区域;虚线范围表示干扰区,即接收信号功率强度大于载波侦听门限(CSThresh)的区域。图中  $AP_1$ ,  $AP_2$  均能向  $MT_1$  提供解调所需的信号强度,  $MT_1$  选择其中信号强度最好的一个 AP 注册。

(2) 分离小区 图 2(b)中来自  $AP_1$  的信号到达  $MT_2$  的位置时衰落到 CSThresh 以下,无法检测。同理  $MT_1$  也不能检

测到来自 AP<sub>2</sub> 的信号。同时 AP<sub>1</sub>、AP<sub>2</sub> 间隔较远, 某小区内  
的用户均无法“听”到另一小区中用户的发送信号。

(3) 非完全分离小区 图 2(c)中两个小区分离, 但距离  
较近, 小区 1 边界附近的移动用户 MT<sub>1</sub> 可以听到其相邻小区  
的同频用户 MT<sub>2</sub> 的发送信号; 此时 MT<sub>1</sub> 将无法与 AP<sub>1</sub> 正常  
通信。因此在小区非完全分离情况下, 注册在不同小区的边  
界用户之间存在同频干扰。

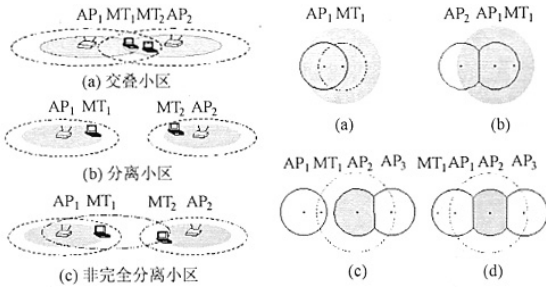


图 2 小区间相对位置关系

图 3 MT<sub>1</sub> 的同频竞争域

同一小区内用户间的竞争及来自相邻小区同频用户的  
干扰, 都会阻碍某移动终端获取信道。假设图 3 中移动终端  
MT<sub>1</sub>、MT<sub>2</sub> 分别注册到接入访问点 AP<sub>1</sub>、AP<sub>2</sub>; 实线表示 AP 的  
接收区边界, 虚线表示干扰区边界。对于 MT<sub>1</sub> 而言, 有 4 种  
情形会造成其他同频竞争者与其竞争信道, 潜在的同频竞争  
者由图 3 中阴影区表示如下:

(1) 处在 MT<sub>1</sub> 辐射区内的用户, 能直接“听”到 MT<sub>1</sub> 的  
信号。见图 3(a)阴影部分。

(2) 处在 AP<sub>1</sub> 干扰区内的同频用户, 包括未注册到 AP<sub>1</sub>  
的同频用户; 见图 3(b)。注意 AP<sub>1</sub> 干扰区内有一部分用户是  
注册到 AP<sub>2</sub> 小区, 当他们占用信道时, AP<sub>1</sub> 检测到信道忙,  
AP<sub>1</sub> 将无法对 MT<sub>1</sub> 的信道请求做出应答, 即 MT<sub>1</sub> 被抑制。

(3) 如果注册到 AP<sub>1</sub> 的终端 MT<sub>1</sub> 同时处在 AP<sub>2</sub> 的干扰区  
内, AP<sub>2</sub> 的注册用户将是 MT<sub>1</sub> 的同频竞争者。在图 3(c)中,  
当 AP<sub>2</sub> 与阴影区的注册用户通信时, MT<sub>1</sub> 将检测到信道忙,  
因此它会保持安静直到小区 2 中的通信传输结束。

(4) 如果 AP<sub>1</sub>、AP<sub>2</sub> 靠得很近, 可以直接相互干扰时, AP<sub>2</sub>  
中的注册用户都是 MT<sub>1</sub> 的同频竞争者。图 3(d)中, AP<sub>1</sub> 可以  
检测到小区 2 中的通信传输, 因而在这段时间内 AP<sub>1</sub> 保持安  
静。此时如果 MT<sub>1</sub> 向 AP<sub>1</sub> 申请信道, AP<sub>1</sub> 将无法响应。

满足以上任一条件的同频用户都是 MT<sub>1</sub> 的同频竞争者,  
所有同频竞争者所处的区域构成 MT<sub>1</sub> 的竞争域。

基于以上分析, 移动用户 MT<sub>i</sub> 的估计吞吐率 THR<sub>i</sub> 为

$$THR_i = \text{DataRate}_i \times Pr_i \times \text{Efficiency}_i \quad (9)$$

$$Pr_i =$$

$$\frac{\frac{P_{\text{succ}}}{1 + \sum_j \text{restrainer}_j} T_i}{\frac{P_{\text{succ}}}{1 + \sum_j \text{restrainer}_j} [T_i + \sum_j (\text{restrainer}_j * T_j)] + P_{\text{idle}} * T_{\text{slot}} + P_{\text{coll}} * T_{\text{coll}}} \quad (10)$$

$$\text{Efficiency}_i = \frac{L_{\text{data}_i} / \text{DataRate}_i}{T_i} \quad (11)$$

其中 Pr<sub>i</sub> 为用户 i 的信道占用概率; Restrainer<sub>j</sub> 代表用户 MT<sub>j</sub>  
的同频竞争者判决因子, 当 MT<sub>j</sub> 是 MT<sub>i</sub> 的同频竞争者时,  
Restrainer<sub>j</sub>=1, 否则为零。假设每个用户业务量饱满, 则大  
量同频竞争者检测到信道空闲时, 假设都会以相同的强度去  
申请信道; 但获取信道后, 不同传输速率的用户对信道的占  
用时长是不同的。式(10)分子表明信道成功用于数据传输的  
概率是由同频竞争者共同分享; 同频竞争者越多, MT<sub>i</sub> 获得  
信道的概率越低。式(10)分母表明信道状态由成功传输、空  
闲、碰撞 3 种可能构成。其中从分母第一项可以发现, MT<sub>i</sub>  
的信道占用概率 Pr<sub>i</sub> 受其同频竞争者传输速率的影响, 因为  
同频竞争者 MT<sub>j</sub> 的传输速率越高, 则 T<sub>j</sub> 越短。Efficiency<sub>i</sub> 为  
用户 i 的传输效率, 表明传输时长中有多大比例用于数据净  
荷的传输; 其受帧内间隔、引导头开销、帧头开销等的影  
响<sup>[4]</sup>; 尤其受传输速率的严重影响<sup>[2]</sup>。

当 AP 间距离大于干扰半径, 但并非完全分离状态时,  
各 AP 已处于满负荷工作状态, 此时注册在同一小区的用户  
的信道占用概率归一化修正为

$$Pr'_i = P_{\text{succ}} \frac{Pr_i}{\sum_{j \in \text{cell}} Pr_j} \quad (12)$$

将所有用户的估计吞吐率 THR<sub>i</sub> 累加, 则得到 WLAN 系  
统估计吞吐率 THR<sub>total</sub>

$$THR_{\text{total}} = \sum_i THR_i \quad (13)$$

### 3 性能仿真

为了验证多小区 WLAN 系统吞吐率估计算法的性能,  
我们在 NS2 平台上进行了系统仿真, 将吞吐率仿真统计结果  
与估计算法结果比较。

#### 3.1 小区间距离对系统吞吐率的影响

此仿真场景 A 中, 网络拓扑包含两个 AP, 两个以太网节  
点和大量在 AP 周围均匀分布的移动终端, 见图 4。几十个  
移动终端通过 AP<sub>1</sub> 或 AP<sub>2</sub> 连接到以太网节点 1、节点 2。空

间传播模型采用 Two-Ray-Ground 模型；各种传输速率对应的 RXThresh 设为 -75, -79, -81, -84dBm, CStresh 设为 -94dBm。一个小区接收信号强度分布图样见图 5, 信号强度单位为 dBm, 网格颗粒度为 175m; 根据 RXThresh 可以得到不同网格内的用户的传输速率, 图 5 中 4 种灰度分别代表了四种传输速率。从所有移动终端向节点 2 均建立了 UDP 连接, 用以承载 CBR 业务。典型的 CBR 分组长度设为 1500byte。所有用户业务量饱满。

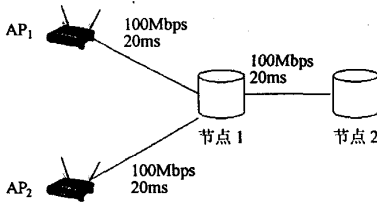


图 4 场景 A 仿真拓扑结构

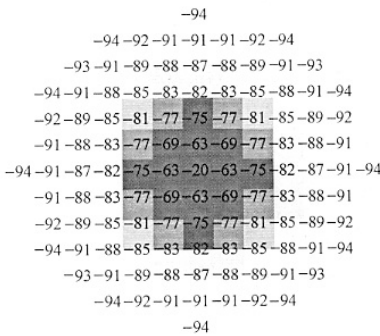


图 5 接收信号强度分布图样

当两个 AP 被配置相同的信道时, 图 6 比较了系统吞吐量仿真结果和估计算法结果。横坐标轴表示 AP 间的距离, 纵坐标轴表示两个小区的总体吞吐量。当 AP 间距离  $D_{AP}$  小于干扰半径( $R_{CS}=1062m$ )时, AP 间存在着严重的干扰, 两个 AP 只能交替工作, 系统吞吐量非常低, 仅能达到一个 AP 的效率。例如两个 AP 完全重叠, 即  $D_{AP}=0m$  时, 系统中共有 13/8/4/12 个用户分别工作在 11/5.5/2/1Mbps 的传输速率上, 此时系统吞吐量只有 1.73Mbps。当 AP 间距离进一步加大, 不再直接干扰时( $D_{AP}>R_{CS}$ ), 两个 AP 都可以满负荷工作, 此时系统吞吐量加倍, 达到 3.47Mbps。

如果两个小区配置了不同的信道, 图 7 显示了由估计算法和仿真得到的系统吞吐量。由图可见, 异频小区交叠可以略微提高系统吞吐量。这是由于如果只有一个 AP<sub>1</sub> 提供覆盖时, 处在小区边界上的移动终端接收信号强度较低, 只能工作在较低的传输速率。如果此时有另一个接入访问点 AP<sub>2</sub> 能提供交叠覆盖, 那么部分低传输速率用户可能重新注册到新

的 AP<sub>2</sub>, 从而变成高传输速率用户。同时, 异频交叠并不会造成小区间干扰。因此小区异频交叠可以略微提高系统吞吐量。

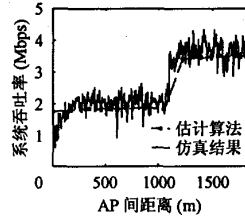


图 6 估计算法和仿真所得两同频小区总吞吐量比较

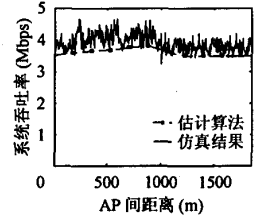


图 7 估计算法和仿真所得两异频小区总吞吐量比较

### 3.2 信道配置方案对系统吞吐率的影响

此仿真场景 B 中, 共有 4 个 AP, 成正方形顶点放置, 相邻 AP 间间距 1050m, 略小于干扰半径  $R_{CS}$ , 见图 8。用户为非均匀分布, 网格颗粒度 175m。移动用户通过各自的注册 AP 连接到节点 2, 建立 UDP 通信。其他相关参数同仿真场景 A。

系统中共有 3 个可供分配的无交叠信道, 标记为 1~3。如果将信道 1 分配给 AP<sub>1</sub>, AP<sub>2</sub>, 信道 2 分配给 AP<sub>3</sub>, 信道 3 分配给 AP<sub>4</sub>, 我们则将此配置方案记为 1123。将 3 个信道分配给 4 个 AP, 共有 6 种不同的配置方案, 即 1111、1112、1122、1221、1123、1231。

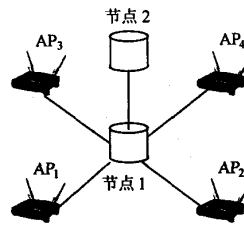


图 8 场景 B 仿真拓扑结构

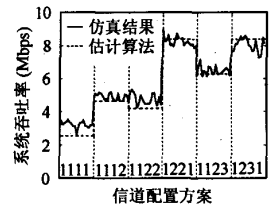


图 9 不同信道配置方案下系统吞吐率的比较

图 9 中实线依次显示了 6 种配置方案的系统吞吐量仿真结果。基于估计算法, 也可得到不同信道配置方案的吞吐量估计值; 图 9 中虚线显示了估计算法的结果。图中发现, 配置方案 1221 虽然只使用了两个信道, 仍然得到很高的系统吞吐量, 这是由于: (1)同频 AP 间距离 1485m, AP 间无直接干扰; (2)小区边界部分用户依然受到相邻小区同频用户的干扰, 他们的通信请求被严重抑制, 小区边界用户一般为低传输速率, 对低传输速率用户的抑制使得系统吞吐量获得增加。当然, 这种系统吞吐量提升所付出的代价是用户间在获取信道资源上的不公平性被加重。

由图可见,信道配置方案对系统性能影响较大,通过吞吐量估计算法,可以有助于更合理地实施系统规划中的信道分配。

通过以上两个场景中估计结果与仿真结果比较表明,估计算法可以给出满意的多小区 WLAN 系统吞吐量估计。

#### 4 结束语

随着 IEEE 802.11 标准的普及,越来越多的园区、大楼开始采用 WLAN 来实现大规模网络覆盖。为了得到更高的系统吞吐量,一般需要放置较多的 AP,障碍物环境的复杂性使得大规模 WLAN 中小区间同频干扰不可避免。同时网络中非均匀分布着各种传输速率的移动用户。对于网络规划者而言,正确估计多小区 WLAN 的系统吞吐量性能,有助于更好地实现网络布局 and 配置。本文提出的多小区 WLAN 吞吐量估计算法可以较好地解决这一任务,通过与仿真结果比较,验证了估计算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] Bianchi G. Performance analysis of IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Trans. on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535 – 547.
  - [2] Jun J, Peddabachagari P, Sichert M. Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications. The 2<sup>nd</sup> IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. Cambridge, MA, USA, 2003: 249 – 256.
  - [3] Xiao Y, Rosdahl J. Throughput and delay limits of IEEE 802.11. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(8): 355 – 357.
  - [4] Kamerman A, Aben G. Net throughput with IEEE 802.11 wireless LANs. *WCNC 2000*. 2000, 2: 747 – 752.
  - [5] Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE 802.11 wireless LAN: capacity analysis and protocol enhancement. *Infocom98*. 1998, 1: 142 – 149.
  - [6] Ziouva E, Antonakopoulos T. The effect of finite population on IEEE 802.11 wireless LANs throughput/delay performance. *MELECON 2002*, Cairo, Egypt, 2002: 95 – 99.
  - [7] Zahedi A, Pahlavan K. Throughput of a wireless LAN access point in presence of natural hidden terminals and capture effects. *PIMRC'96*, 1996, 2: 397 – 401.
  - [8] Huang K-C, Chen K-C. Interference analysis of nonpersistent CSMA with hidden terminals in multicell wireless data networks. *PIMRC'95*, 1995, 2: 907 – 911.
  - [9] Takaya K, Maeda Y, Kuwabara N. Interference characteristics between 2.4-GHz-band middle-speed wireless LANs using direct sequence and frequency hopping. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1999: 690 – 693.
  - [10] Kamerman A. Throughput density constraints for wireless LANs based on DSSS. *Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings*, Mainz, Germany, 1996, 3: 1344 – 1350.
  - [11] Park J A, Park S K, Cho P D, Cho K R. Analysis of spectrum channel assignment for IEEE 802.11b wireless LAN. 5<sup>th</sup> International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Honolulu, HI, USA, 2002, 3: 1073 – 1077.
  - [12] Heusse M, Rousseau F, Berger-Sabbatel G, Duda A. Performance anomaly of 802.11b. *Infocom2003*, San Francisco, CA, USA, 2003, 2: 836 – 843.
- 凌翔: 男, 1972年生, 讲师, 博士生, IEEE 会员, 研究方向为无线通信与个人通信。
- 阳坤: 男, 1969年生, 副教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究方向为网络通信。
- 严少虎: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为无线通信。
- 吴诗其: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星通信, 移动通信。