

# WLAN 中基于“小区呼吸”的多约束负载均衡

王胜灵 崔 勇 徐 恪 吴建平

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘 要** 在无线局域网(WLAN)中,负载不均衡会降低网络吞吐量、增加分组传输时延.由于无需修改客户端的优点,研究者们将码分多址(CDMA)网络中的“小区呼吸”概念引入 WLAN 以实现负载均衡.“小区呼吸”方法通过改变接入点(AP)的信标功率,从而改变 AP 的覆盖范围,进而控制 AP 的用户数.现有的同类方案在使用“小区呼吸”方法时,大多没有考虑两个比较重要的问题:AP 的负载均衡与用户数据功率损失的矛盾以及 AP 的业务可用性(包括 AP 业务欺骗和业务漏洞).文中将这两个问题作为使用“小区呼吸”进行负载均衡的约束,首先对多约束负载均衡问题进行形式化定义,然后提出分析模型来求解关键参数,如相邻 AP 的负载差、平均数据功率损失代价以及 AP 全覆盖的条件.最后,采用遗传算法(GA)求解多约束负载均衡问题,并测试在不同用户密度下,所提方案和同类方案的 AP 负载、吞吐量以及平均分组传输成功率.实验表明,所提方案实现了优化.

**关键词** 无线局域网;小区呼吸;功率控制;负载均衡;数据功率损失;业务可用性

**中图法分类号** TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2009.01947

## Multi-Constraint Load Balancing Based on Cell Breathing in WLAN

WANG Sheng-Ling CUI Yong XU Ke WU Jian-Ping

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

**Abstract** In WLAN, load imbalance incurs two problems: lower network throughput and longer transmission delay. To realize load balancing, researchers introduced the concept of cell breathing in Code Division Multiple Access (CDMA) networks into wireless local area networks (WLANs) due to requiring no special modification of clients. Cell breathing technique adjusts APs' coverage area through adjusting their beacon power to control the load of APs. Most of existing load balancing methods based on cell breathing did not care two key problems: the tradeoff between load balancing on APs and data power loss of users, as well as the service availability of APs (including AP service cheating and AP service loophole). In this paper, these two problems are viewed as constraints when using cell breathing method to realize load balancing. Firstly the problem of multi-constraint load balancing is formulated, and then some analytical models are proposed to solve key parameters such as the load gap of two neighboring APs, the average data power loss cost and the condition of AP full coverage. At last, the genetic algorithm is employed to solve the problem of multi-constraint load balancing, and test the proposed scheme and the similar scheme in terms of AP load, throughput and the average successful transmission probability under different user density. The simulation shows the proposed scheme realizes optimization.

**Keywords** wireless local network; cell breathing; power control; load balancing; data power loss; service availability

收稿日期:2009-07-15;最终修改稿收到日期:2009-08-28.本课题得到国家自然科学基金(60873252)、中瑞合作计划(2008DFA11630)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2007CB307105,2009CB320501,2009CB320502,2009CB320503)资助.王胜灵,女,1978年生,博士,主要研究方向为移动互联网、服务质量、无线网络、功率控制等. E-mail: slwang@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn.崔 勇,男,1976年生,博士,副教授,主要研究方向为移动互联网、网络体系结构、服务质量和分布式路由协议等.徐 恪,男,1974年生,博士,博士生导师,主要研究领域为新一代互联网体系结构、高性能路由器体系结构、P2P 与应用层网络等.吴建平,男,1953年生,博士,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、形式化技术与协议测试、高性能路由和交换技术.

## 1 引 言

由于具有部署便捷、覆盖范围广以及传输速率高等优点,WLAN 得到了广泛的应用.然而,WLAN 的负载经常会出现不均衡现象,这会导致两个问题:从网络角度来看,降低了吞吐量;从用户角度来看,延长了分组的传输时间.在 WLAN 中,用户采用载波侦听多路访问(CSMA)的方式来与 AP 通信,所有用户具有相同的机会占用无线信道.因此,随着 AP 接入的用户数增加,用户争用信道的冲突也随之增加,很多带宽浪费在分组重传上,降低了网络的吞吐量.此外,当冲突产生时,用户会采取随机退避机制,这无疑延长了分组的传输时间.

然而,以 IEEE 802.11<sup>[1]</sup>为协议标准的 WLAN 并没有提出任何负载均衡的方案.为此,研究者们提出了很多负载均衡方法. Balachandran 等人<sup>[2]</sup>提出用户在选择 AP 时除了要考虑所收到的信号强度指示外,还要考虑 AP 所能提供的最小带宽;Bejerano 等人<sup>[3]</sup>证明了公平性和负载均衡的关系,并利用负载均衡技术实现了近似优化的最大最小公平带宽分配.此外,在关于 WLAN 负载均衡的文献中,很多研究对负载提出了不同的衡量标准,如 AP 关联的用户数<sup>[4]</sup>、AP 在使用最快调制方式时所能提供的容量(AAC)<sup>[5]</sup>、上行和下行链路的聚合流量<sup>[6]</sup>、信道空闲时间<sup>[7]</sup>、信道利用率估计(CUE)<sup>[8]</sup>等等.上述所有方案均需要对 WLAN 用户端进行软件或硬件上的修改,这大大地阻碍了这些方案的大规模部署和应用,因为在 WLAN 中,客户端往往是异构的,即它们可能由不同的厂商生产,异构的客户端可能具有不同的 AP 选择策略.由于各厂商所提出的负载均衡策略可能不同,异构的客户端和 AP 很难协作实现负载均衡.

为了避免 WLAN 客户端的修改,一些研究者<sup>[5,9-10]</sup>提出将 CDMA 网络中的概念——“小区呼吸”(cell breathing)引入 WLAN.当“小区呼吸”运用到 WLAN 时,它本质上是一种通过功率控制实现负载均衡的方法.具体来说,当 AP 负载重时,通过减少信标(beacon)消息的功率以缩小其覆盖范围,从而拒绝一些用户的关联;当 AP 负载轻时,通过增加 beacon 消息的功率以扩大其覆盖范围,从而吸引更多的用户请求关联.由于减少 AP 的数据功率会降低其正在服务的用户的数据传输质量,因此,“小区呼吸”将数据和 beacon 消息的功率分离,该方法仅仅调节 beacon 消息的功率,从而改变小区的

覆盖范围.

从上述工作原理可看出,“小区呼吸”不需要对 WLAN 客户端作任何的修改.用户只需根据从 AP 所收到的 beacon 功率大小,即 IEEE 802.11 的缺省方式,选择合适的 AP 进行关联.因此,这种方法实现简单,具有更广的应用前景.这样的优点也吸引了一些研究者的关注.

Bejerano 和 Han<sup>[9]</sup>基于“小区呼吸”方法提出了两个算法以实现负载均衡.第 1 个算法是为了减小最拥塞 AP 的负载,而第 2 个算法则求出最优的最小最大负载均衡结果.在实际用时,这两个算法需要配合使用才能实现最大化吞吐量和公平性的目的.然而,该方法所提出的求解模型是一个 NP 难问题,需要多次迭代才能找到合适的解,并且每次迭代均会触发功率的实际调整,这可能导致用户的频繁切换.

Bahl 等人<sup>[10]</sup>首先构建了一个具有权重的二分图,其中节点是 AP 和用户端的集合,而边则连接了 AP 与用户,边权与 AP 和用户的距离成正比;然后,通过建立线性规划模型,找到了用户与 AP 之间的最佳匹配,最后利用“小区呼吸”方法调整 beacon 消息的功率.该方法虽然不需要多次迭代,但由于仅考虑了距离因素,使得用户更倾向选择离他最近的 AP 进行关联,当多个用户都离某个 AP 较近时,负载会出现不均衡现象.

Garcia 等人<sup>[5]</sup>根据用户所收到的信噪比(SNR)来调节 AP 的 beacon 消息功率,从而改变其覆盖范围,实现负载均衡.为了得到 SNR 信息,该方案需要借助一些新的协议标准,如 IEEE 802.11k 或者 IEEE 802.11h.

上述所提的基于“小区呼吸”实现负载均衡的方法中,均没有考虑到调整 beacon 功率所引入的一些问题.我们认为,如果这些问题没有得到很好的解决,那么“小区呼吸”方法就不能实现有效的负载均衡,我们将这些问题总结为如下的两点:

(1) AP 的负载均衡与用户数据功率损失的矛盾.我们用一个例子来说明该问题.如图 1 所示,WLAN 中包含两个 AP,即 AP  $i$  和  $j$ .在两个 AP 的覆盖范围的交叠区域内,有 5 个用户,即用户  $A-F$ ,他们均可以选择 AP  $i$  或  $j$  中的任意一个作为服务 AP.从负载均衡的角度来看,如果这 5 个用户均选择 AP  $j$ ,则 AP  $i$  和  $j$  之间的负载差会最小,但是由于 AP  $i$  的数据功率大于 AP  $j$  的数据功率,当这 5 个用户都选择 AP  $j$  时,他们所接收到的数据功率

都会减小. 由于用户所接收的数据功率对其通信质量至关重要, 因此, 仅考虑 AP 的负载均衡而不顾用户的数据功率损失是不合理的.

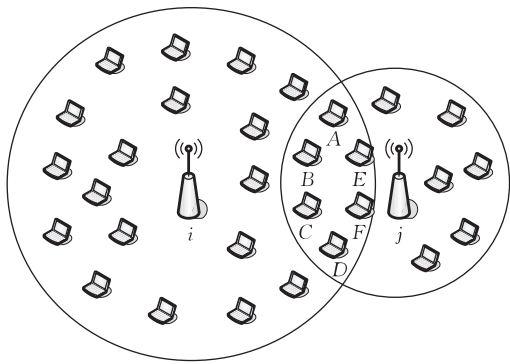


图 1 AP 的负载均衡与用户数据功率损失

(2) AP 的业务可用性. 在“小区呼吸”方法中, 用户仅依据所收到的 beacon 功率大小来选择 AP, 所以 beacon 功率对 AP 业务的可用性有重要影响. 一方面, 如果 beacon 功率大于数据功率, 则那些感知 beacon 功率但是不能实际接收数据功率的用户, 在连接到 AP 后不会得到 AP 的服务, 我们称这种现象为 AP 服务欺骗; 另一方面, 如果 AP 的 beacon 功率不能覆盖整个区域, 则一些用户就不能连接到任何 AP 上, 我们称这种现象为 AP 服务漏洞.

综上所述, 要使用“小区呼吸”来实现负载均衡, 需要解决调整 beacon 功率所引入的上述两大问题. 此外, 当 AP 的 beacon 功率发生变化时, 一些用户会被迫发生切换, 这势必会带来切换延迟, 影响用户的上层应用, 因此使用“小区呼吸”来实现负载均衡, 必须减小 beacon 功率调整的频率, 避免用户的频繁切换.

本文基于“小区呼吸”方法提出了一种多约束的负载均衡算法, 该算法除了实现负载均衡外, 力图解决“小区呼吸”所带来的上述两个问题. 本文首先对使用“小区呼吸”方法实现多约束负载均衡问题进行形式化定义, 并提出分析模型来求解关键参数, 如相邻 AP 的负载差、相邻 AP 交叠区内用户发生切换时造成的平均数据功率损失代价以及 AP 全覆盖的条件. 最后, 采用 GA 求解最佳小区覆盖半径, 并测试了不同用户密度下, 所提方案和同类方案的 AP 负载、吞吐量以及用户的平均分组传输成功率. 实验表明, 所提方案实现了优化.

## 2 问题的定义

在“小区呼吸”中, 数据功率和 beacon 功率是分

离的, 由于无需修改用户端的软/硬件, WLAN 用户仅感知 AP 的 beacon 功率, 并依据 beacon 功率来选择 AP. 但实际上, 用户从该 AP 处收到的数据功率决定了他所获得的数据链路质量. 在本方案中, 为了反映用户所得数据链路质量与 AP 的关系, 我们将网络中的用户分为两类: 原始用户和切换用户, 其定义如下.

**定义 1**(原始用户). AP  $i$  的原始用户是从 AP  $i$  接收的数据功率比从其它 AP 接收的数据功率都大的用户.

**定义 2**(切换用户). AP  $i$  的切换用户是其它 AP 的原始用户且当前接入 AP  $i$  的用户.

显然, AP  $i$  的用户不是原始用户就是切换用户.

根据用户所收到的数据功率和 beacon 功率, 以每个 AP 为中心, 实际形成了两个载波侦听范围 (CR).

**定义 3**(数据载波侦听范围 DCR). AP  $i$  的数据载波侦听范围 ( $DCR_i$ ) 是能感知到 AP  $i$  的数据功率的范围.

**定义 4**(beacon 载波侦听范围 BCR). AP  $i$  的 beacon 载波侦听范围 ( $BCR_i$ ) 是能感知到 AP  $i$  的 beacon 功率的范围.

在 WLAN 中, 为了避免 AP 服务漏洞, 在一个区域中往往部署多个 AP, 因此, 有以下定义.

**定义 5**(相邻 AP). AP  $i$  和  $j$  是相邻的当且仅当他们的 DCR 满足  $DCR_i \cap DCR_j \neq \emptyset$ .

如前所述, “小区呼吸”方法所需解决的问题之一就是 AP 的负载均衡与用户的数据功率损失之间的矛盾, 为此, 我们有如下定义.

**定义 6**(平均数据功率损失代价). AP  $i$  和  $j$  的 BCR 交叠区域内的平均数据功率损失代价 ( $L_p(i, j)$ ) 定义为 AP  $i(j)$  的原始用户切换到 AP  $j(i)$  的平均数据功率损失与接入 AP  $i(j)$  时的平均数据接收功率之比.

此外, 为了保证 AP 服务的可用性, 避免 AP 服务欺骗和服务漏洞, 一方面, beacon 功率不应该超过数据功率, 另一方面, beacon 的功率应实现 BCR 全覆盖. 值得注意的是: 如果 DCR 不是全覆盖的, 那么由于 AP 部署及避免 AP 服务漏洞的原因, BCR 也不可能达到全覆盖. 在这种情况下, 整个区域可以划分为多个子域, 在每个子域中 DCR 是全覆盖的. 因此这里讨论的 BCR 全覆盖的前提条件是: DCR 也是全覆盖的.

论文问题的目标是通过调整 beacon 功率实现负载均衡, 同时将所有相邻 AP 的平均数据接收功

率损失代价之和限制在给定的阈值  $T_P$  内,并保证 AP 的服务可用性,如下式所示:

$$\begin{aligned} & \text{MIN} \sum_{i,j \text{ are neighbors}} G_L(i,j) \\ & \text{s. t.} \sum_{i,j \text{ are neighbors}} L_P(i,j) \leq T_P \\ & P_{\text{BMIN}}(j) \leq P_B(j) \leq P_D(j), i,j=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $G_L(i,j)$  是两个邻居 AP 的负载差,这里负载定义为 AP 所接入的用户数. 约束条件 2 使得 AP  $j$  的 beacon 功率  $P_B(j)$  不大于其数据功率  $P_D(j)$ ,以避免服务欺骗,并不小于实现 BCR 全覆盖所需的最小 beacon 功率( $P_{\text{BMIN}}(j)$ ),以避免服务漏洞. 其中,  $N$  是网络中的 AP 总数.

此外,为了减小用户切换的频率,在所提方案中,只有当相邻 AP 的负载差大于给定的阈值  $T$  后,才对式(1)进行求解,调整 AP 的 beacon 功率,否则不对 AP 的 beacon 功率做任何改变. 为了求解式(1),我们提出如下的分析模型得到关键参数.

### 3 邻居 AP 的负载差

假设两个邻居 AP  $i$  和  $j$  的 Euclidean 距离为  $L$ , 又设他们的功率分别为  $P(i)$  和  $P(j)$ , 不失一般性,不妨设  $P(i) \geq P(j)$ , 我们以数据功率较大的 AP, 即 AP  $i$  的位置为原点建立坐标, 则两个 AP 的功率所形成的  $CR_i$  和  $CR_j$  如图 2 中实线圆圈所示.

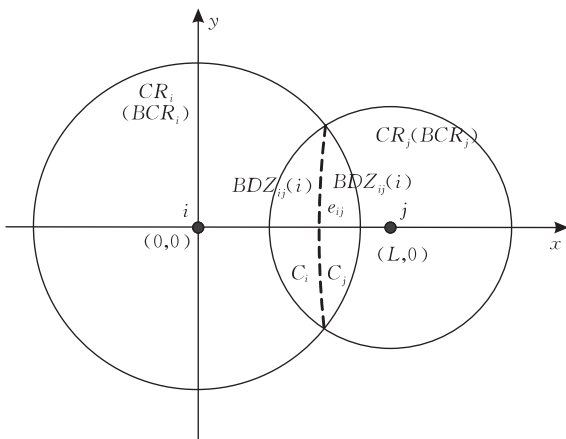


图 2 邻居 AP 的负载差

为简单起见,假设用户从 AP 处接收到的功率只与其距离有关,根据文献[10]的无线传播模型可知,用户  $u$  从 AP  $j$  处接收到的功率  $P_R(u,j)$  为

$$P_R(u,j) = \frac{\alpha P(j)}{D(u,j)^\alpha} \quad (2)$$

图 2 中,  $D(u,j)$  是用户  $u$  和 AP  $j$  的距离,  $\alpha$  是

衰减因子,本文中  $\alpha=2$ . 由图 2 可知,在 AP  $i$  和  $j$  的 CR 交叠区域  $C(i,j)$  内,用户可以同时收到 AP  $i$  和  $j$  的功率,因此,我们有如下定义.

**定义 7(等功线).** 等功线  $e_{ij}$  是互为邻居的 AP  $i$  和  $j$  的 CR 交叠区域  $C(i,j)$  内的一条线,位于这条线上的用户从这两个 AP 中收到的功率相等.

**定理 1.** 等功线具有如下两个性质:

(1) 等功线  $e_{ij}$  将  $C(i,j)$  分为两部分  $C_i$  和  $C_j$ , 其中,  $C_i$  ( $C_j$ ) 是交叠区域内  $CR_j$  ( $CR_i$ ) 的弧与等功线组成的区域,则在  $C_i$  ( $C_j$ ) 中的所有用户从 AP  $i$  (AP  $j$ ) 所收到的功率大于从 AP  $j$  (AP  $i$ ) 所收到的功率;

(2) 当 AP 的功率与 CR 的面积成正比时,等功线必过两个 AP 的 CR 交点.

证明.

(1) 根据定义 7,在等功线上的任意用户  $u \in e_{ij}$  从 AP  $i$  和  $j$  所收到的功率  $P_R(u,i)$  与  $P_R(u,j)$  相同,由式(2)可得  $P(i)/D^2(u,i) = P(j)/D^2(u,j)$ . 在  $C_i$  中的任意用户  $u' \in C_i$  与 AP  $i$  的距离均小于  $u$  与 AP  $i$  的距离,即  $D(u',i) < D(u,i)$ ,且  $u'$  与 AP  $j$  的距离均大于  $u$  与 AP  $j$  的距离,即  $D(u',j) > D(u,j)$ ,于是有  $P(i)/D^2(u',i) > P(j)/D^2(u',j)$ ,即在  $C_i$  中的任意用户  $u'$  从 AP  $i$  收到的功率  $P_R(u',i)$  大于从 AP  $j$  收到的功率  $P_R(u',j)$ . 由于用户  $u'$  的任意性,可知:在  $C_i$  中的所有用户从 AP  $i$  所收到的功率大于从 AP  $j$  所收到的功率.

同理可证:在  $C_j$  中的所有用户从 AP  $j$  所收到的功率大于从 AP  $i$  所收到的功率.

(2) 根据已知条件,当 AP 的功率与 CR 的面积成正比时,可容易推出等功线  $e_{ij}$  与  $CR_i$  的交点和与  $CR_j$  的交点重合,因此,等功线必过两个 AP 的 CR 交点. 证毕.

由于 CR 分为 DCR 和 BCR,相应地,等功线分为 DCR 等功线和 BCR 等功线. 显然,DCR 等功线和 BCR 等功线具有定理 1 所述的两个性质.

**定义 8(支配区).** AP  $i$  相对 AP  $j$  的支配区  $BDZ_{ij}(i)$ , 是在 AP  $i$  与其邻居 AP  $j$  的 BCR 交叠区域中,由 BCR 等功线  $e_{Bij}$  和 AP  $j$  的 BCR 弧所围成的区域.

AP  $i$  相对 AP  $j$  的支配区  $BDZ_{ij}(i)$  以及 AP  $j$  相对 AP  $i$  的支配区  $BDZ_{ij}(j)$  如图 2 所示. 根据定理 1 可知,在  $BDZ_{ij}(i)$  中的用户从 AP  $i$  收到的 beacon 功率大于从 AP  $j$  收到的 beacon 功率. 同样,在  $BDZ_{ij}(j)$  中的用户从 AP  $j$  收到的 beacon 功率大于从 AP  $i$  收到的 beacon 功率. 由于用户仅依

靠 beacon 功率大小选择 AP, 因此, 两个 AP 的负载差  $G_L(i, j)$  为

$$G_L(i, j) = |U(BCR_i) - U(BCR_j) - U(BDZ_{ij}(j)) + U(BDZ_{ij}(i))| \quad (3)$$

上式中,  $U(BCR_i)$ ,  $U(BCR_j)$ ,  $U(BDZ_{ij}(j))$  及  $U(BDZ_{ij}(i))$  分别是在区域  $BCR_i$ ,  $BCR_j$ ,  $BDZ_{ij}(j)$  和  $BDZ_{ij}(i)$  的用户数, 其计算如下:

$$U(BCR_i) = \int_{-r_{Bi}}^{r_{Bi}} \int_{-\sqrt{r_{Bi}^2 - x^2}}^{\sqrt{r_{Bi}^2 - x^2}} f(x, y) dx dy \quad (4)$$

$$U(BCR_j) = \int_{L-r_{Bj}}^{L+r_{Bj}} \int_{-\sqrt{r_{Bj}^2 - (x-L)^2}}^{\sqrt{r_{Bj}^2 - (x-L)^2}} f(x, y) dx dy \quad (5)$$

$$U(BDZ_{ij}(i)) =$$

$$\begin{cases} \int_{-\sqrt{r_{Bi}^2 - \left(\frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}\right)^2}}^{\sqrt{r_{Bi}^2 - \left(\frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}\right)^2}} \int_{-\sqrt{r_{Bj}^2 - y^2} + L}^{\sqrt{\frac{T_B L^2}{(T_B - 1)^2} - y^2} + \frac{T_B L}{T_B - 1}} f(x, y) dx dy, & T_B > 1 \\ \int_{-\sqrt{r_{Bi}^2 - L^2}/4}^{\sqrt{r_{Bi}^2 - L^2}/4} \int_{-\sqrt{r_{Bj}^2 - y^2} + L}^{L/2} f(x, y) dx dy, & T_B = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$U(BDZ_{ij}(j)) =$$

$$\begin{cases} \int_{-\sqrt{r_{Bi}^2 - \left(\frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}\right)^2}}^{\sqrt{r_{Bi}^2 - \left(\frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}\right)^2}} \int_{\sqrt{\frac{T_B L^2}{(T_B - 1)^2} - y^2} + \frac{T_B L}{T_B - 1}}^{\sqrt{r_{Bj}^2 - y^2}} f(x, y) dx dy, & T_B > 1 \\ \int_{-\sqrt{r_{Bi}^2 - L^2}/4}^{\sqrt{r_{Bi}^2 - L^2}/4} \int_{L/2}^{\sqrt{r_{Bj}^2 - y^2}} f(x, y) dx dy, & T_B = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式(4)~式(7)中,  $r_{Bi}$  和  $r_{Bj}$  分别是 AP  $i$  和  $j$  的 BCR 半径,  $T_B = P_B(i)/P_B(j)$ ,  $f(x, y)$  是用户密度函数, 它与用户所在的地理位置密切相关. 在现实环境中, 用户的密度是可以事先获得的, 比如在电影院、教室、候机场等地, 用户的密度分布可以通过统计数据或者管理信息, 如电影的放映时间、课程安排、航班计划等得到. 上述方法具有通用性, 一旦给出了用户的密度、AP 的位置及 beacon 功率的大小, 相邻 AP 的负载差就可以通过上述方法计算出来.

#### 4 平均数据接收功率损失代价

虽然用户的数据链路质量由 AP 的数据功率决定, 但是用户选择 AP 是依据 beacon 功率的大小, 当 beacon 的功率迫使 AP 的一部分原始用户关联到其它 AP, 即成为其它 AP 的切换用户时, 这部分

用户的数据接收功率会发生损失.

假设 AP  $i$  的数据功率大于等于 AP  $j$  的数据功率, 由于需实现负载均衡的缘故, 当 AP  $i$  的一个原始用户  $u$  切换到其邻居 AP  $j$  后, 由定义 6 可知, 他的数据功率损失  $l_P(u, i)$  为

$$l_P(u, i) = \frac{P_{RD}(u, i) - P_{RD}(u, j)}{P_{RD}(u, i)} = 1 - \frac{D^2(u, i)}{T_D D^2(u, j)} \quad (8)$$

上式中,  $P_{RD}(u, i)$  和  $P_{RD}(u, j)$  分别是用户  $u$  从 AP  $i$  和  $j$  处所收到的数据功率, 而  $T_D = P_D(i)/P_D(j)$ .

当 beacon 的功率改变, 使得 BCR 等功线和 DCR 等功线不同时, 必然会带来数据功率损失, 由于  $P_D(i) \geq P_D(j)$ , 根据定义 6, 此时在 AP  $i$  和  $j$  的 BCR 交叠区域内的用户的平均数据功率损失  $L_P(i, j)$  为

$$L_P(i, j) = 1 - \frac{\overline{D^2(i)}}{\overline{D^2(j)}} \quad (9)$$

上式中,  $\overline{D(i)}$  和  $\overline{D(j)}$  分别是在 AP  $i$  和  $j$  的 BCR 等势线  $e_{Bij}$  和 DCR 等势线  $e_{Dij}$  所围成的区域内(如图 3 所示)切换到 AP  $j$  的 AP  $i$  的原始用户距离  $i$  和  $j$  的平均距离, 其计算如下:

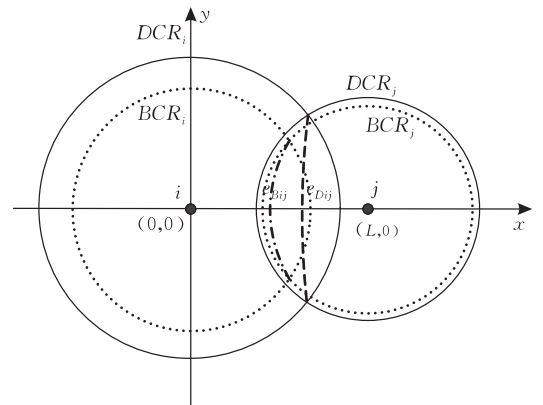


图 3 平均数据功率损失代价

$$\begin{aligned} \overline{D(i)} &\approx \\ \frac{1}{S_{ij}} &\left( \int_{y_{B1}}^{y_{D1}} \int_{\frac{y(x_B - x_D) - y_{D1} x_B + y_{B1} x_D}{y_{B1} - y_{D1}}}^x \sqrt{x^2 + y^2} f(x, y) dx dy + \right. \\ &\int_{y_{D4}}^{y_{B4}} \int_{\frac{y(x_B - x_D) - y_{D4} x_B + y_{B4} x_D}{y_{B4} - y_{D4}}}^x \sqrt{x^2 + y^2} f(x, y) dx dy + \\ &\left. \int_{y_{B4}}^{y_{B1}} \int_{\gamma}^x \sqrt{x^2 + y^2} f(x, y) dx dy \right) \quad (10) \\ \overline{D(j)} &\approx \\ \frac{1}{S_{ij}} &\left( \int_{y_{B1}}^{y_{D1}} \int_{\frac{y(x_B - x_D) - y_{D1} x_B + y_{B1} x_D}{y_{B1} - y_{D1}}}^x \sqrt{(x-L)^2 + y^2} \cdot \right. \\ &\left. f(x, y) dx dy + \right. \\ &\left. \int_{y_{D4}}^{y_{B4}} \int_{\frac{y(x_B - x_D) - y_{D4} x_B + y_{B4} x_D}{y_{B4} - y_{D4}}}^x \sqrt{(x-L)^2 + y^2} f(x, y) dx dy + \right. \end{aligned}$$

$$\int_{y_{B4}}^{y_{B1}} \int_{\gamma}^x \sqrt{(x-L)^2 + y^2} f(x, y) dx dy \quad (11)$$

其中,  $S_{ij}$  是 AP  $i$  和  $j$  的 BCR 等势线  $e_{Bij}$  和 DCR 等势线  $e_{Dij}$  所围成区域的用户数, 其计算如下:

$$S_{ij} \approx \int_{y_{B1}}^{y_{D1}} \int_{\frac{y(x_B - x_D) - y_{D1}x_B + y_{B1}x_D}{y_{B1} - y_{D1}}}^x f(x, y) dx dy + \int_{y_{D4}}^{y_{B4}} \int_{\frac{y(x_B - x_D) - y_{D4}x_B + y_{B1}x_D}{y_{B4} - y_{D4}}}^x f(x, y) dx dy + \int_{y_{B4}}^{y_{B1}} \int_{\gamma}^x f(x, y) dx dy \quad (12)$$

式(10)、式(11)和式(12)中,  $x_B$  和  $x_D$  分别是两个 AP 的 BCR 和 DCR 交点的横坐标, 而  $y_{B1}$  和  $y_{D1}$  分别是两个 AP 的 BCR 和 DCR 交点在第一象限的纵坐标,  $y_{B4}$  和  $y_{D4}$  分别是两个 AP 的 BCR 和 DCR 交点在第 4 象限的纵坐标, 其值如下:

$$x_D = \frac{r_{Di}^2 - r_{Dj}^2 + L^2}{2L}, \quad y_{D1} = \sqrt{r_{Di}^2 - \left(\frac{r_{Di}^2 - r_{Dj}^2 + L^2}{2L}\right)^2},$$

$$y_{D4} = -\sqrt{r_{Di}^2 - \left(\frac{r_{Di}^2 - r_{Dj}^2 + L^2}{2L}\right)^2},$$

$$x_B = \frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}, \quad y_{B1} = \sqrt{r_{Bi}^2 - \left(\frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}\right)^2},$$

$$y_{B4} = -\sqrt{r_{Bi}^2 - \left(\frac{r_{Bi}^2 - r_{Bj}^2 + L^2}{2L}\right)^2}.$$

此外,  $\chi$  和  $\gamma$  的取值如下:

$$\chi = \begin{cases} \sqrt{\frac{T_D L^2}{(T_D - 1)^2} - y^2} + \frac{T_D L}{T_D - 1}, & T_D > 1 \\ L/2, & T_D = 1 \end{cases}$$

$$r_{Bj} = \max \left\{ R_{ijk} \left| \begin{array}{l} R_{ijk} = \frac{D(i, j) \cdot D(i, k) \cdot D(j, k)}{4 \sqrt{p_{ijk} (p_{ijk} - D(i, j)) (p_{ijk} - D(i, k)) (p_{ijk} - D(k, j))}} \\ p_{ijk} = \frac{D(i, j) + D(i, k) + D(j, k)}{2}, i, k \text{ 是 AP } j \text{ 的任意邻居} \end{array} \right. \right\} \quad (13)$$

则网络是 BCR 最小全覆盖。

证明. 在本论文中, 我们只考虑网络面覆盖, 而不是线覆盖, 因此要实现 BCR 最小全覆盖, 则需要保证任意 3 个相邻 AP 的 BCR 覆盖无缝隙, 且这 3 个 AP 的 BCR 仅有一个交点, 如图 4 所示. 为了寻

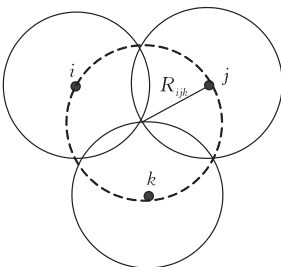


图 4 3 个相邻 AP 的 BCR 最小覆盖

$$\gamma = \begin{cases} \sqrt{\frac{T_B L^2}{(T_B - 1)^2} - y^2} + \frac{T_B L}{T_B - 1}, & T_B > 1 \\ L/2, & T_B = 1 \end{cases}$$

值得注意的是:  $T_D$  和  $T_B$  不能同时为 1. 因为当两者同时为 1 时, 意味着 DCR 半径相同的两个 AP 以相同的幅度缩小了它们的 BCR, 此时, DCR 等势线和 BCR 等势线重合, 表明这两个 AP 并没有为对方做任何负载分担, AP  $i$  ( $j$ ) 的用户不会切换至 AP  $j$  ( $i$ ). 由于 AP  $i$  和  $j$  的任意性, 上述方法可以用于计算任意两个相邻 AP 交叠区域中用户的平均数据功率损失代价。

## 5 BCR 全覆盖

如前所述, 为了避免 AP 的服务漏洞, 必须保证在 DCR 全覆盖的情况下, BCR 也是全覆盖的. 本节分析 BCR 达到最小覆盖的条件。

**定义 9**(BCR 最小全覆盖). BCR 最小全覆盖是指在 DCR 全覆盖的情况下, BCR 也达到全覆盖且相邻 AP 的 BCR 交集最小。

容易获知, 在 DCR 是全覆盖的 WLAN 中, 如果任意 3 个相邻 AP 的 BCR 覆盖无缝隙, 则网络是 BCR 全覆盖的。

**定理 2.** 如果网络中任意一个 AP  $j$  的 beacon 功率使其 BCR 的半径  $r_{Bj}$  等于与其相邻的任意两个 AP 所构成的三角形的最大外接圆半径, 即

找使得 3 个 AP 的 BCR 有交集的最小条件, 我们过 3 个 BCR 的圆心做一个外接圆, 则外接圆的半径 (即式(13)中的  $R_{ijk}$ ), 就是使得 3 个相邻 AP 的覆盖范围无缝隙的最小半径。

由上面的分析可知, 当 AP  $j$  的相邻 AP 不只 2 个时, AP  $j$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的最小 beacon 功率  $P_{BMIN}(j)$  必须使其 BCR 的半径  $r_{Bj}$  等于与其相邻的任意两个 AP 所构成的三角形的最大外接圆半径才能实现最小全覆盖. 得证. 证毕。

## 6 仿真实验

本节对所提方案和文献[10]中的方案进行对比。

由于 beacon 功率与 BCR 半径密切相关,我们假定  $P_B(j) = \psi \pi r_{Bj}^2$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ), 这里  $\psi$  是常数. 这样,求解 AP 的 beacon 功率就转化为求解各 AP 的 BCR 半径. 如式(1)所述, AP 的 BCR 半径的求解为 NP 难问题,为保证求解的实时性,我们采用 GA 来求解.

在 GA 中,染色体采用实数编码,表示为  $X = [x_1 \dots x_j \dots x_N]$ , 其中  $x_j$  为第  $j$  个 AP 的 BCR 半径,即  $r_{Bj}$ . 在染色体的生成中,需要随机生成各 AP 的 BCR 半径,为了减少无效解,本文限制了 BCR 半径的取值范围,只在有效范围内进行随机取值,即 BCR 半径的有效上限为相应 AP 的 DCR 半径,下限为保证相邻 AP 之间 BCR 全覆盖的最小半径,该值可以利用式(13)计算出. 这种染色体生成方式,有效缩小了 AP 的搜索空间,提供了搜索效率和解的精度.

根据式(1)可以推导出 GA 的适应度函数  $F(X) = f(X) + p(X)$ , 其中,  $f(X)$  是式(1)的目标函数,  $p(X)$  为罚函数,其定义为

$$p(x) = \sum_{\text{对于每对相邻的AP}} \begin{cases} \omega L_P(i, j), & L_P(i, j) > T_P \\ 0, & L_P(i, j) \leq T_P \end{cases}$$

在 GA 的迭代过程中,采用了精英策略,即每次迭代,都将上一代种群的最优个体直接复制到下一代种群,并参与种群内的交叉操作. GA 算法中涉及参数的取值和含义如表 1 所示.

表 1 仿真参数

参数名	参数值	说明
$G$	20	种群规模
$N$	20	染色体长度,即 AP 个数
$p_c$	0.8	交叉率
$p_m$	0.01	变异率
$T_P$	0.1	功率损失阈值
$\omega$	100	功率损失惩罚系数
$R_{MAX}$	100	BCR 半径上限
$R_{MIN}$	55.7	BCR 半径下限(根据仿真拓扑计算得到)

为了模拟真实环境,本节的仿真场景根据实际场景中的情况进行设定,即随着场景中用户的移动,场景中各个区域的用户密度是动态变化的. 本文场景中部署了 20 个 AP,以  $5 \times 4$  矩阵的形式均匀分布在一个  $450\text{m} \times 346\text{m}$  的矩形区域内,直接相邻的 3 个 AP 构成等边三角形,邻接 AP 之间的距离为 100m. 每个 AP 的 DCR 半径固定为 100m,且用户密度在每个 AP 的 DCR 范围内变化. 场景中 AP 的分布拓扑如图 5 所示.

在本节中,我们以 AP 负载标准差、AP 的平均饱和吞吐量和用户的分组传输成功率为性能衡量标

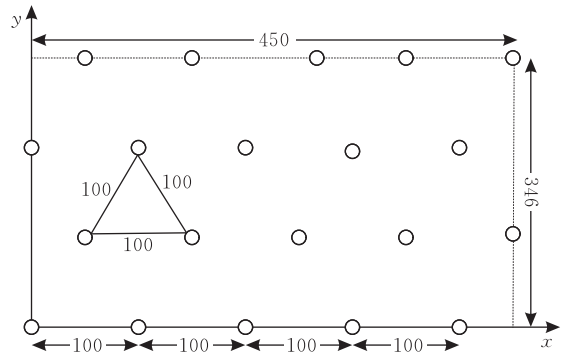


图 5 仿真场景中的 AP 部署情况

准. 其中,吞吐量是在一个信道时槽的长度内,传输的数据量除以信道时槽的长度. 它是 AP 的用户数量  $n$  的函数. 单个 AP 的吞吐量  $\Theta(\beta)$  可通过下式计算<sup>[11]</sup>:

$$\Theta(\beta) = (n\beta(1-\beta)^{n-1}L) / \left( (1+n\beta(1-\beta)^{n-1}) \left( \frac{L}{C} + T_o \right) + (1 - (1-\beta)^n - n\beta(1-\beta)^{n-1}) T_c \right) \quad (14)$$

$\beta$  是某个用户在单个时槽的时间内尝试进行发送的概率,这一概率认为对所有该 AP 的用户都是相同的.  $\beta$  的计算<sup>[11]</sup> 如下所示:

$$\beta = G(r) \quad (15)$$

其中,  $G(r)$  可以通过下述方法<sup>[11]</sup> 求解:

$$r = 1 - (1 - (G(r)))^{n-1} \quad (16)$$

$$G(r) = \frac{1 + r + r^2 + \dots + r^K}{b_0 + rb_1 + r^2b_2 + \dots + r^Kb_K} \quad (17)$$

上式中  $b_K = p^K b_0$ .

按照上述公式计算出的各个 AP 的吞吐量取平均值,即可反映整个网络的吞吐量.

此外,我们的另一个性能指标传输成功率是指在数据包传输过程中,在没有发生信道阻塞的情况下,数据顺利发送完成的概率. 传输成功率  $P_s$  可通过下式计算<sup>[12]</sup> 获得

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n} \quad (18)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{[n+2(n-1)(T_c^* - 1)]/n-1}}{(n-1)(T_c^* - 1)} \quad (19)$$

仿真中的具体参数如表 2 所示.

在本文的实验中,使用了按比例增加的方法来生成每个 AP 的 DCR 范围内的用户密度,即先在  $[0.0, 0.005]$  范围内生成一组用户密度作为基准用户密度,然后将用户密度范围扩大到原来的 1.2 倍,即  $[0.0, 0.006]$ ,并在该范围内生成一组新的用户密度值,按照上述规律,重复以上步骤,直到生成全部的 10 组用户密度值. 10 组用户密度的取值如图 6 所示.

表 2 仿真参数

参数名	参数值	描述
$L$	8000bit	数据包的平均长度
$C$	11Mbps	链路速率
$T_o$	$52^{[11]}$	包传输的固定冗余(单位:时隙)
$T_c$	$17^{[11]}$	RTS(Request To Send)冲突的固定冗余(单位:时隙)
$\sigma$	20 $\mu$ s	时隙长度
$K$	2	最大退避次数
$b_0$	$16^{[11]}$	初始后退时长(单位:时隙)
$p$	$2^{[11]}$	指数后退倍数
$T_c^*$	$17.26^{[12]}$	常量

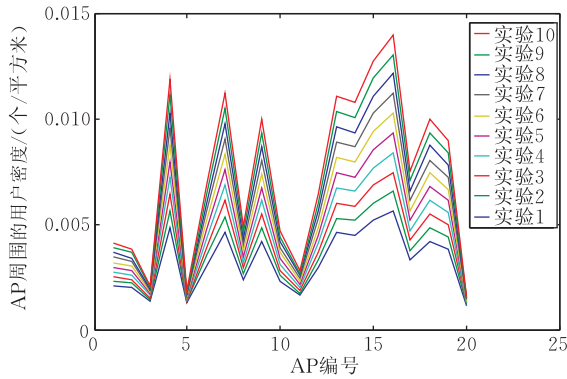


图 6 各次实验用户密度分布

图 7 显示了当用户密度逐渐增加时,采用所提方案和对比方案的 AP 负载标准差的变化情况.从图 7 可以看出,所提方案的 AP 负载标准差低于对比方案的 AP 负载标准差.这是因为,所提方案可以根据各个 AP 的负载情况,动态调整 AP 的覆盖范围,使得用户密度大的 AP 缩小覆盖范围,减少接入用户,而用户密度小的 AP 则增大覆盖范围,增加用户数量,尽量减少 AP 之间的负载差,实现了负载均衡.对比方案使用线性规划方法寻找能够覆盖所有用户和 AP 的最小权重匹配,并且用户与 AP 边的权重与他们之间的距离成正比.因此,该方法的直接结果是使得用户倾向于选择最近 AP 进行关联.在用户密度逐渐增加时,这会导致负载不均衡.

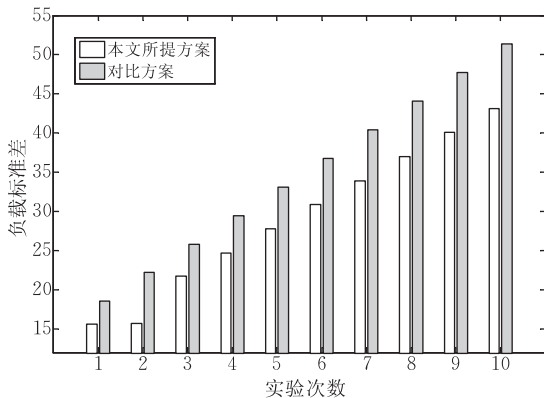


图 7 AP 负载标准差对比

图 8 显示了随着用户密度的增加,两种方案中 AP 饱和吞吐量均值的变化情况.仿真场景中,每个用户都以最大速率发送分组,随着 AP 接入用户的增加,竞争冲突也随之增加,这导致 AP 的饱和吞吐量的急剧下降.由图中可以看出,所提方案的饱和吞吐量均值大于对比方案.这是因为所提方案在实现负载均衡方面的效果较好,通过在 AP 之间分摊负载,减缓了用户竞争信道的压力,进而减缓了 AP 饱和吞吐量的下降.

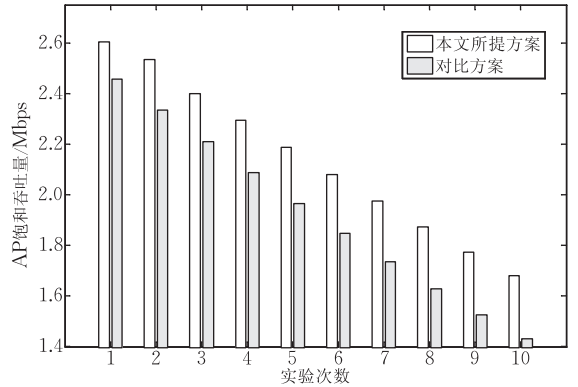


图 8 饱和吞吐量均值

图 9 显示了随用户密度的增加,两种方案的平均分组传输成功率的对比情况.如图所示,随着负载的增加,所提方案的分组传输成功率始终高于对比方案.与饱和吞吐量的对比结果同理,由于所提方案的负载均衡较好,使分组传输中的冲突概率降低,因而有效地提高了分组的传输成功率.

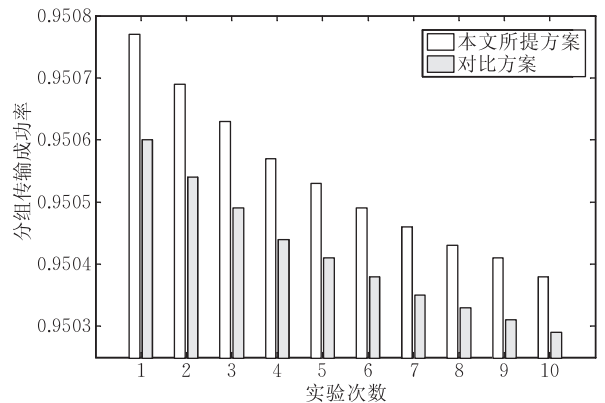


图 9 平均分组传输成功率

## 7 结 论

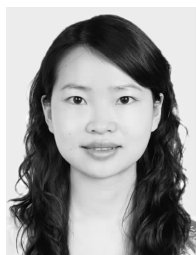
在无线局域网(WLAN)中,负载不均衡会降低网络吞吐量,增加分组传输时延.本文基于“小区呼吸”方法提出了一种多约束的负载均衡算法,该算法

除了实现负载均衡外,力图解决“小区呼吸”所引入的 AP 的负载均衡与用户数据功率损失的矛盾以及 AP 的业务可用性问题(包括 AP 业务欺骗和业务漏洞). 本文将这两个问题作为使用“小区呼吸”进行负载均衡的约束,首先对多约束负载均衡问题进行形式化定义,然后提出分析模型来求解关键参数,如相邻 AP 的负载差、相邻 AP 交叠区内用户发生切换时造成的平均数据功率损失代价以及 AP 全覆盖的条件. 最后,采用 GA 求解最佳小区覆盖半径,并测试了在 10 组不同的用户密度下,所提方案和同类方案的 AP 负载、吞吐量以及用户的平均分组传输成功率. 实验表明,所提方案的负载较为均匀,减小了同一 AP 中用户的信道争用,使得 AP 的吞吐量得到提高,且每个用户的平均分组传输成功率也得到了提高.

### 参 考 文 献

- [1] IEEE Std 802.11-1997 Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE, Nov. 1997
- [2] Balachandran A, Bahl P, Voelker G M. Hot-spot congestion relief and service guarantees in public-area wireless networks. SIGCOMM Computing Communication Review, 2002, 32(1): 59
- [3] Bejerano Y, Han S-J, Li L E. Fairness and load balancing in wireless LANs using association control//Proceedings of the ACM Mobicom 2004. Philadelphia, PA, USA, 2004: 315-329

- [4] Papanikos I, Logothetis M. A study on dynamic load balance for IEEE 802.11b wireless LAN//Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Communication and Control: Telecommunications/Signal Processing (COMCON). Rethimno, Greece, 2001: 83-89
- [5] Garcia E, Vidal R, Paradells J. Cooperative load balancing in IEEE 802.11 networks with cell breathing//Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2008). Marrakech, 2008: 1133-1140
- [6] Velayos H, Aleo V, Karlsson G. Load balancing in overlapping wireless LAN cells//Proceedings of the IEEE ICC. New York, USA, 2004: 3833-3836
- [7] Guo F, Chiueh T. Scalable and robust WLAN connectivity using access point array//Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN). Yokohama, Japan, 2005: 288-297
- [8] Sawma G, Aib I, Ben-El-Kezadri R, Pujolle G. ALBA: An autonomic load balancing algorithm for IEEE 802.11 wireless networks//Proceedings of the IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS 2008). Salvador, Bahia, 2008: 891-894
- [9] Bejerano Y, Han S. Cell breathing techniques for load balancing in wireless LAN//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2006. Barcelona, Spain, 2006: 1-13
- [10] Bahl P, Hajiaghayi M T et al. Cell breathing in wireless LANs: Algorithms and evaluation. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(2): 164-178
- [11] Kumar Anurag, Altman Eitan, Miorandi Daniele, Goyal Munish. New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 wireless LANs, Technical Report RR-5218, INRIA, Sophia-Antipolis, France, June 2004
- [12] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547



**WANG Sheng-Ling**, born in 1978, Ph. D.. Her research interests include Mobile internet, QoS, wireless network, power control and so on.

**CUI Yong**, born in 1976, Ph. D., associate professor. His research interests include Mobile IPv6, network archi-

ture, QoS, distributed routing protocol and so on.

**XU Ke**, born in 1974, Ph. D., Ph. D. supervisor. His research interests include network architecture in the new generation internet, high-performance router architecture, P2P and application network, etc.

**WU Jian-Ping**, born in 1953, Ph. D., Ph. D. supervisor. His research interests include computer network, formal techniques and protocol tests, high-performance routing and switching technique.

### Background

The problem researched in this paper is load balancing in WLANs. The researchers at home and abroad have been pro-

posed some schemes, most of which require the clients to select the APs based on not only the RSSI but also the load on

the APs. This requirement needs clients to have some special software/hardware supports, which induces a practical issue.

To solve the above problems, some researchers introduce the concept of cell breathing in code division multiple access (CDMA) network into WLANs for load balancing. Most of existing load balancing methods based on cell breathing did not care two key problems: the tradeoff between load balancing on APs and data power loss of users, as well as the service availability of APs (including AP service cheating and AP service loophole). In this paper, these two problems are viewed as constraints when using cell breathing method to realize load balancing.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60873252) and China-Sweden cooperative project(No. 2008DFA11630). These projects focus on

some network optimization problems in both wireless backbone and access network sides. In wireless backbone side, the authors devote to solving the mobility management in mesh network (the corresponding achievements are published in IEEE LCN, IEEE ICC, Chinese Journal of Computers, Journal of Software and so on), routing in wireless backbone (the corresponding achievement is published in IEEE LCN). In wireless access network side, the authors focus on call admission control (the corresponding achievements are published in IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, IEEE ICTAD), multi-path routing and AP association selection.

The content of this paper belongs to AP association selection. Through adjusting adaptively the beacon power of AP, the load balancing of AP is realized.