

基于 QoS 保障的密集 WLAN 多维资源分配算法

张琦, 赵林靖, 李建东

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对密集无线局域网覆盖环境, 以提升网络性能为目标, 提出了一种多维无线资源分配方法。通过网络覆盖衡量参数、干扰衡量参数和 QoS 衡量参数联合评估网络性能, 建立了网络性能与资源分配向量之间的优化目标函数, 进而采用禁忌搜索的方法求解目标函数后得到最优多维资源分配向量, 包括所用 AP、信道和功率分配向量。仿真结果表明, 所提算法提升了网络性能, 更好地保证了用户 QoS 需求。

关键词: 无线局域网; 多维资源分配; 禁忌搜索; 网络性能评估

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0150-07

Multi-dimension resource allocation algorithm based on QoS guarantee in dense WLAN

ZHANG Qi, ZHAO Lin-jing, LI Jian-dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A multi-dimension radio resource allocation method was proposed to improve the network performance in dense WLAN. By joint evaluation of the network covering, interference between cells and user's QoS satisfaction, the object function of the radio resource allocation was founded and tabu search method was used to find the optimum solution of the object function. The optimum solution is the resource allocation vector including the best AP set, AP's channel set and power set. The simulation results show that the proposed method improves the network performance and provides a better guarantee of user's QoS requirement.

Key words: WLAN; multi-dimension radio resource allocation; tabu search; network performance evaluation

1 引言

近几年来, 无线局域网 (WLAN, wireless local area network) 技术发展迅猛, 由于其具有数据速率高和成本低的特点, WLAN 被广泛部署在公司、机场、会议中心等热点区域, 为用户提供高速的数据传输。随着 WLAN 接入点 (AP, access point) 的覆盖越来越密集, 造成 AP 之间的同频干扰越来越大, 严重影响了 WLAN 网络的总容量, 导致网络不能很好地满足用户的业务需求。因此为了提升 WLAN

网络的性能, 优化 WLAN 网络的资源分配就显得格外重要。

作为提升无线网络性能的重要手段, 无线资源分配成为近年来的研究热点, 从最初研究单一资源分配, 发展到现在的多种资源联合动态分配。文献 [1~3] 分别针对不同单一资源的分配进行了专门的研究: 文献 [1] 利用图论着色的方法研究了 AP 之间的信道分配问题; 文献 [2] 提出了一种联合调整传输功率和载波侦听门限的功率控制方法, 避免了由于功率调整而导致的隐藏终端和饥饿终端数目增多

收稿日期: 2012-08-31; 修回日期: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61231008, 60902032); 国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03003005-005); 高校科研基本业务费基金资助项目(K50511010008); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852); 高等学校创新引智计划基金资助项目(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61231008, 60902032); The National S&T Major Project (2012ZX03003005-005); Fundamental Research Funds for the Central Universities(K50511010008); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT0852); The 111 Project(B08038)

的问题; 文献[3]研究了在满足用户速率需求的前提下, 使所用 AP 个数最少的规划问题。文献[4~6]则研究了联合 AP 规划和信道选择的资源分配方法: 文献[4]通过整数规划联合解决了选择 AP 个数和信道分配的问题; 文献[5]在综合考虑无线局域网的多速率特性、MAC 层特性、AP 的覆盖范围和用户 QoS 需求的基础上, 提出了一种联合解决 AP 规划和信道分配的算法; 文献[6]则以谋求系统吞吐量最大和资源分配公平为目标, 提出了一种联合 AP 放置和信道分配的资源分配算法。文献[7]则是针对联合 AP 规划和功率分配的研究, 通过调整 AP 的功率, 选择出使网络代价最小的 AP 组合。

本文在文献[5]的研究基础上, 提出一种可用于密集无线局域网覆盖环境下的多维资源联合分配算法, 构建了一个从多角度衡量网络性能的目标函数, 通过在候选 AP 组合、信道组合、功率组合组成的联合集合中搜索最优解使目标函数达到最小, 从而得到网络在 3 个维度上的最佳资源分配方案。通过仿真可以发现, 与文献[5]中算法相比, 提升了网络的吞吐量和能效, 更好地满足了用户的 QoS 需求。

2 系统模型

考虑一个室内密集无线局域网的下行链路, 系统中有 M 个 AP、 N 个用户, 假设已知 AP 和用户的分布和位置, 第 m 个 AP 的发射功率为 P_m , 如果第 n 个用户关联至第 m 个 AP, 那么用户 n 接收到第 m 个 AP 的信干噪比 $SINR(n, m)$ 为

$$SINR(n, m) = \frac{P_m H_{mn}}{\sigma_n^2 + I_n} \quad (1)$$

其中, H_{mn} 表示 AP_m 到用户 n 的信道衰落, σ_n^2 表示用户 n 收到的噪声功率, I_n 表示用户 n 受到的干扰。记用户 n 的关联 AP 为 $AP_{m'}$, 那么用户 n 受到的干扰主要来自与 $AP_{m'}$ 使用相同信道且同时传输的其他 AP, 本文近似认为所有与 $AP_{m'}$ 同信道的 AP 都对用户 n 造成干扰。记在用户 n 处收到的 AP_m 的信号强度为

$$RSSI(n, m) = P_m H_{mn} \quad (2)$$

记与 $AP_{m'}$ 同信道的 AP 集合为 A_{sc} , 则用户 n 受到的干扰 I_n 可以表示为

$$I_n = \sum_{k \in A_{sc}, k \neq m'} RSSI(n, k) \quad (3)$$

设用户 n 关联至与接收信干噪比最大的 AP, 记用户 n 可获得的最大信干噪比为 $SINR_{\max}(n)$, 对应

的 AP 为 $AP_{m'}$, 即表示为

$$SINR_{\max}(n) = \max_m SINR(n, m) = SINR(n, m') \quad (4)$$

当用户 n 与 $AP_{m'}$ 相关联时, 其能获得的吞吐量 d_n 可表示为^[6]

$$d_n = DR_n \cdot Pr_n \cdot E_n \quad (5)$$

其中, DR_n 表示用户 n 的数据速率, 其值与用户 n 与 AP 之间的信干噪比 $SINR_{\max}(n)$ 有关; Pr_n 表示用户 n 成功接入信道的概率, 其值等于一次成功传输所用时间占整个竞争过程所用时间的比例; E_n 表示数据传输时间占整个 MAC 帧传输时间的比例, 是为了计算吞吐量时减去 WLAN 的组帧开销。根据 WLAN 使用的 CSMA/CA 接入协议, 当用户 n 竞争信道时, 无论竞争者是其同小区的用户, 还是使用相同信道的邻近小区的用户, 都会出现空闲、成功传输和碰撞 3 种情况, 而不同用户的速率、竞争者数目以及占用信道时长会不同, 因此每个用户成功传输和竞争信道所用时间也不同, 那么每个用户的 Pr_n 也不相同, 其值与系统中的用户数和分布有关。 Pr_n 和 E_n 的计算方法详见参考文献[6]。

用户的信干噪比 $SINR(n, m)$ 、接收信号强度 $RSSI(n, m)$ 、受到的干扰 I_n 和获得的吞吐量 d_n 等参数均与网络中正在使用的 AP 以及这些 AP 的配置有关, 例如: 信道和发射功率。将网络所用的 AP 组合、信道组合、功率组合构成的集合定义为网络的资源分配向量 S , 并且表示为

$$\begin{aligned} S &= \{A, C, P\} \\ A &= (a_1, \dots, a_m, \dots, a_M) \\ C &= (c_1, \dots, c_l, \dots, c_L) \\ P &= (p_1, \dots, p_l, \dots, p_L) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, A 表示候选 AP 组合, a_m 等于 0 或 1, 分别表示第 m 个 AP 处于关闭或工作状态, 设网络中共有 L 个 AP 被选中处于工作状态 ($L \leq M$); C 表示工作中的 AP 所使用的信道向量, c_l 表示第 l 个 AP 使用的信道标号, 根据 IEEE 802.11 标准, 其值可取互不重叠的 3 个信道中的任意一个; P 表示工作中的 AP 使用的功率向量, p_l 表示第 l 个 AP 使用的功率, 假设每个 AP 有 h 个离散功率等级可以选择。

3 资源分配的优化目标函数

为了提高网络的吞吐量, 满足用户的需求, 必须对网络资源分配进行优化, 因此准确地衡量网络性能在资源分配过程中至关重要。网络的性能需要

从覆盖范围、干扰和用户的服务质量 (QoS, quality of service) 来衡量, 并且不能牺牲一个参数而满足其他参数, 因此通过定义覆盖衡量参数、干扰衡量参数和服务质量衡量参数, 构建资源分配算法的优化目标函数, 以实现密集 WLAN 的多维资源分配。

对于任意一个资源分配向量 \mathbf{S} :

定义 1 覆盖衡量参数 $f_{\text{cov}}(\mathbf{S})$ 评估使用不同 AP 时网络的覆盖情况, 并且 $f_{\text{cov}}(\mathbf{S})$ 表示为

$$f_{\text{cov}}(\mathbf{S}) = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{n \in N} Q(\text{SINR}_{\max}(n))^2} \quad (7)$$

式(7)中的罚函数 $Q(\text{SINR})$ 为递减函数, 定义为

$$Q(\text{SINR}) = \begin{cases} Th_{54} - Th_6, & \text{SINR} < Th_6 \\ Th_{54} - \text{SINR}, & Th_6 \leq \text{SINR} < Th_{54} \\ 0, & \text{SINR} \geq Th_{54} \end{cases} \quad (8)$$

其中, Th_6 、 Th_{54} 分别表示 IEEE 802.11g 系统中能达到 6 Mbit/s、54 Mbit/s 速率传输所需的最小信干噪比。如果一个用户的信干噪比小于 Th_6 , 那么该用户无法与 AP 通信, 表明网络没有覆盖到该用户, 此时的罚函数值为最大; 如果用户的信干噪比大于 Th_{54} , 表明该用户接入网络并且可以获得最高速率 54 Mbit/s, 此时罚函数等于零; 式(8)说明用户的速率随着信干噪比的增大而增加, 其罚函数值随信干噪比的增加而减小。IEEE 802.11g 系统中一共可以支持 6 Mbit/s、9 Mbit/s、12 Mbit/s、18 Mbit/s、24 Mbit/s、36 Mbit/s、48 Mbit/s、54 Mbit/s 8 种传输速率, 根据文献[3], 不同传输速率所需的最小信干噪比如表 1 所示。

表 1 不同传输速率所需的最小信干噪比

速率/(Mbit·s ⁻¹)	信干噪比门限/dB
54	24.56
48	24.05
36	18.80
24	17.04
18	10.79
12	9.03
9	7.78
6	6.02

最优的资源分配向量 \mathbf{S} 可以使所有用户的信干噪比大于 Th_{54} , 从而可以接入网络, 并以 54 Mbit/s 的速度传输, 此时网络覆盖衡量参数值为零。反之, 如果所有用户的信干噪比都低于 Th_6 , 即所有用户

都无法连接到网络, 那么覆盖衡量参数达到最大值, 表明资源分配向量 \mathbf{S} 是最差的配置。对于资源分配向量 \mathbf{S} , 如果它对应的覆盖衡量参数值越小, 表示该资源分配向量 \mathbf{S} 越优, 网络覆盖度越好。

定义 2 干扰衡量参数 $f_I(\mathbf{S})$ 评估每个用户受到的干扰, 并且 $f_I(\mathbf{S})$ 表示为

$$f_I(\mathbf{S}) = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{n \in N} \max(I_n - \sigma_n^2, 0)^2} \quad (9)$$

其中, σ_n^2 表示用户 n 处的噪声功率, I_n 表示用户 n 受到的干扰。为了提高频谱资源的利用率, 相邻的 2 个小区使用不同的信道, 以避免由于载波侦听使得他们无法有效地使用无线信道, 从而降低网络性能。通常采用基于图论的信道分配算法避免相邻小区使用相同频率, 降低干扰。对于每个候选 AP 组合, 本文使用文献[6]中提出的方法为每个 AP 分配信道, 然后计算并比较不同 AP 组合的干扰衡量参数, 找到最优的 AP 组合使网络干扰最小。

根据干扰衡量参数的定义, 如果一个资源分配向量 \mathbf{S} 对应的干扰衡量参数值越小, 说明用户在该资源分配向量下受到的干扰越小, 那么这个资源分配向量就越好。特别地, 当干扰小于背景噪声功率时, 干扰衡量参数等于零。

定义 3 QoS 衡量参数 $f_{\text{QoS}}(\mathbf{S})$ 评估每个用户 QoS 的满足情况, 并且表示为

$$f_{\text{QoS}}(\mathbf{S}) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n \in N} \max(10 \lg(D_n^*) - 10 \lg(d_n), 0)^2} \quad (10)$$

其中, D_n^* 表示用户 n 的 QoS 需求, 即目标吞吐量, 由用户的业务决定, d_n 表示在资源分配向量 \mathbf{S} 下用户 n 获得的实际吞吐量, 根据式(5)计算可得。为了与覆盖衡量参数和干扰衡量参数的单位保持一致, D_n^* 和 d_n 取 dB 形式。

QoS 衡量参数表示每个用户 QoS 的不满意程度, 显然, 用户获得的实际吞吐量越大, 其满意度越好, 相应 QoS 衡量参数值就越小。

根据以上 3 个参数对网络性能进行评估, 可以确定在优化网络性能时: 1) 保证网络的覆盖区域使得用户都可以接入网络, 并以尽可能高的速度传输数据; 2) 合理的资源分配可以使用户受到的干扰尽可能地小, 从而提高信道利用率; 3) 最大程度地满足网络中每个用户的 QoS 需求。为了同时实现以上 3 个目标, 定义资源分配的联合优化目标函数为

$$\min f(\mathbf{S}) = \alpha_1 f_{\text{cov}}(\mathbf{S}) + \alpha_2 f_I(\mathbf{S}) + \alpha_3 f_{\text{QoS}}(\mathbf{S}) \quad (11)$$

其中, $f_{\text{cov}}(\mathbf{S})$ 、 $f_I(\mathbf{S})$ 、 $f_{\text{QoS}}(\mathbf{S})$ 分别表示资源分配向量 \mathbf{S} 对应的覆盖衡量参数、干扰衡量参数和 QoS 衡量参数值, α_1 、 α_2 、 α_3 分别表示 3 个参数在目标函数中的权重, 对于不同的场景, 可以通过设置不同的权重, 调整三者的比重关系。通过寻找一个资源分配向量使目标函数 f 达到最小, 就可以得到最优的网络配置和性能。

4 目标函数的求解

根据目标函数的定义, 其候选解 \mathbf{S} 是一组离散集合, 获得最优解可以通过比较不同集合中各元素的目标函数值。在候选集合中, 首先从 M 个 AP 中找到 L 个 AP 使目标函数最小, $L \in [1, M]$, 共有 $\sum_{L=1}^M C_M^L$ 种候选组合, 而 L 个 AP 有 h^L 种可选功率组合, 则一共有 $\sum_{L=1}^M C_M^L h^L$ 种组合, 使用穷尽搜索法求解是不现实的。本文在文献[5]的基础上, 采用一种启发式算法——禁忌搜索寻找目标函数的近似最优解。

禁忌搜索算法作为一种亚启发式搜索算法, 是对局部邻域搜索的一种扩展, 是一种全局逐步寻优算法。它在当前解 \mathbf{S} 的邻域 $V(\mathbf{S})$ 中搜索最优解, 将得到的最优解再作为当前解, 以进行下一次搜索。在搜索最优解的过程中, 通过禁忌列表这一存储结构记录每次的最优解, 以避免迂回搜索和陷入本地搜索, 即若邻域中的最优解已存在于禁忌列表, 表示此解在以前的搜索中已经出现过, 则取邻域中的次优解进行校验。此外还可以通过藐视准则, 赦免一些被禁忌的优良解, 即若当前解优于目前所得的最优解, 则可以忽略其被禁忌的事实。通过这些设置, 保证了多方向的有效搜索以最终实现全局优化。

在求解目标函数的过程中, 首先在候选功率集合中进行禁忌搜索得到当前 AP 组合的最佳功率向量, 然后在 AP 组合的邻域中再使用禁忌搜索得到最优的 AP 组合, 经过两层搜索找到最优的 AP 组合及其分配的信道和功率向量, 算法的流程如图 1 所示。

1) 初始化候选 AP 组合, 初始最优解 \mathbf{S}_{opt} 为空, $f(\mathbf{S}_{\text{opt}})$ 为无穷大。

2) 按照文献[6]中基于图论着色的信道分配方法给当前组合中的各 AP 分配信道。

3) 按照最大信干噪比准则确定用户与组合中各 AP 的关联关系。

4) 对各 AP 组合中各 AP 分配功率:

① 初始化候选功率集合, 第一次各 AP 均采用最大功率发射;

② 计算在功率集合中各功率向量为 \mathbf{P} 时的目标函数值, 按照禁忌搜索的方法查找目标函数的最小值, 得到当前最优功率向量 $\mathbf{P}_{\text{cur_opt}}$;

③ 判断是否满足功率搜索的终止条件, 若满足, 则转步骤 5), 否则, 产生当前最优功率向量 $\mathbf{P}_{\text{cur_opt}}$ 的邻域作为下次搜索的初始功率集合, 转步骤 4) 中的①;

5) 得到由 $A_{\text{cur_opt}}$ 、 $\mathbf{P}_{\text{cur_opt}}$ 和信道分配结果组成的当前最佳资源分配方案 \mathbf{S}_{cur} 。

6) 判断 \mathbf{S}_{cur} 与 \mathbf{S}_{opt} 的目标函数值大小, 若 $f(\mathbf{S}_{\text{cur}}) < f(\mathbf{S}_{\text{opt}})$, 则转步骤 7); 否则, 转步骤 8)。

7) 更新系统最优解, 令系统最优解等于当前解, 即 $\mathbf{S}_{\text{opt}} = \mathbf{S}_{\text{cur}}$ 。

8) 判断是否满足 AP 组合的搜索终止条件: 若满足, 则转步骤 9), 否则, 产生当前最优 AP 组合 $A_{\text{cur_opt}}$ 的邻域作为下次搜索的初始候选 AP 组合, 转步骤 1)。

9) 算法完成, 得到当前网络的最佳资源分配方案 \mathbf{S}_{opt} , 包括使用的 AP 组合 A_{opt} , 其信道向量 \mathbf{C}_{opt} 和功率向量 \mathbf{P}_{opt} , 各 AP 按照 \mathbf{S}_{opt} 重构其参数。

按以上步骤进行禁忌搜索的过程中, 邻域、禁忌列表和终止条件的设置分别如下。

AP 组合 A 的邻域向量: 用一个未选中使用的 AP 替换 A 中任一被选中使用的 AP, 或增加一个 AP 选中使用, 或删除一个选中使用的 AP 后形成的 AP 组合向量, 整个邻域集合含有 $L(M-L)+M$ 个 AP 组合向量; AP 功率向量 \mathbf{P} 的邻域向量为: 调整选中 AP 中的一个 AP 的功率得到的新功率向量, 邻域集合共有 $L(h-1)$ 个功率向量。

禁忌列表的配置: 设禁忌列表的长度为 T , 其存储的是最近 T 次迭代搜索中所找到的当前最优解, T 的值可采用固定值或者随机值。在本文进行 AP 向量搜索过程中, 每次迭代 AP 组合的禁忌列表长度为 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 之间一个随机数^[5], 其中, $T_{\min} = M/2$, $T_{\max} = M$; 搜索功率向量时, 禁忌列

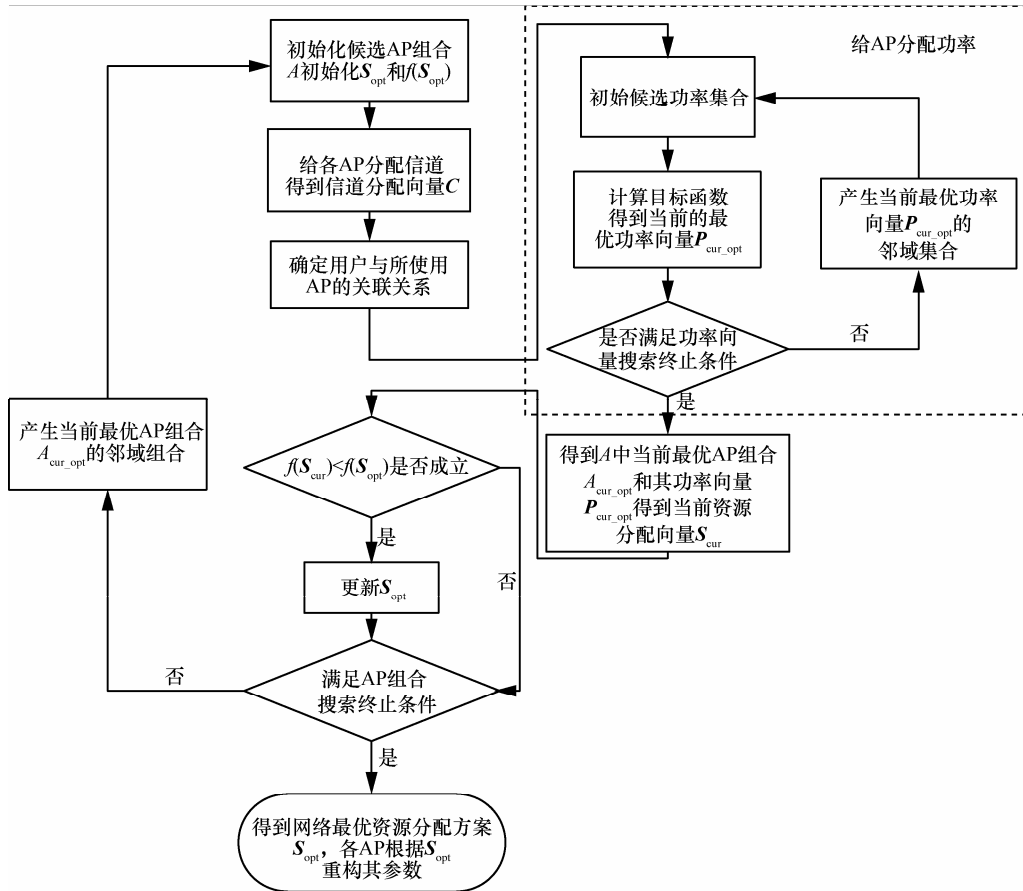


图 1 算法执行流程

表长度取固定值 $T = h^L / 2$ 。

终止条件的设置：当满足下面 3 个条件^[5]中任一个时，就可使算法终止：

- ① 迭代次数达到了上限 NI_{max} ；
- ② 目标函数值在连续 NIC_{max} 次迭代后无改善；
- ③ 目标函数的返回值为 0。

5 仿真结果

假设一个室内办公室场景，如图 2 所示，整个区域共有 8 间办公室，共有 12 个 AP 可供选择使用。以 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的小格为单位划分整个区域，每个小格内随机分布 0~3 个用户，使用 MATLAB 进行仿真。

信道衰减模型采用 Two-Ray-Ground 模型^[8]，取无线信号穿墙损失和拐弯损失的典型值分别为 15 dB 和 10 dB^[6]，每个 AP 的发射功率可设置为 20 dBm、17 dBm 和 14 dBm，即 $h = 3$ ，噪声功率 $\sigma_n = -94\text{ dBm}$ 。执行禁忌搜索时， $NI_{max} = 1\ 000$ ， $NIC_{max} = 200$ ，3 个衡量参数的权重 α_1 、 α_2 、 α_3 均为 1。

资源分配算法性能通过以下参数评估（如表 2

所示），分别为：1) 使用的 AP 个数；2) 被网络覆盖的用户数占总用户数的比例 R_{cov} ；3) 信道分配后受干扰的用户数占总用户数的比例 R_i ；4) 达到目标吞吐量的用户数占总用户数的比例 R_{QoS} ；5) 网络总吞吐量；6) 消耗的总功率 P_{total} 。表 2 中的仿真结果说明，当网络性能达到最优时，与文献[5]只规划网络所选用的 AP 和信道的算法相比，本文算法通过联合 AP 规划、信道分配和功率分配后，不仅提升了网络的总吞吐量，还降低了网络消耗的总功率，提高了网络的能效。

图 3 说明整个区域内只需放置 6 个 AP 就可使网络性能达到最优，放置过多的 AP 会增加 AP 间的干扰，导致网络性能下降。图 4 给出了选择使用的 6 个 AP 和其使用的 3 个信道（分别用 3 种灰度表示，黑色表示关闭的 AP），6 个 AP 的发射功率分别为 $AP_1: 17\text{ dBm}$ 、 $AP_2: 20\text{ dBm}$ 、 $AP_3: 14\text{ dBm}$ 、 $AP_4: 17\text{ dBm}$ 、 $AP_{10}: 14\text{ dBm}$ 、 $AP_{12}: 14\text{ dBm}$ 。结合图 2 可以看出用户密集区域分配较多的 AP，而用户稀少的地区则分配较少的 AP。

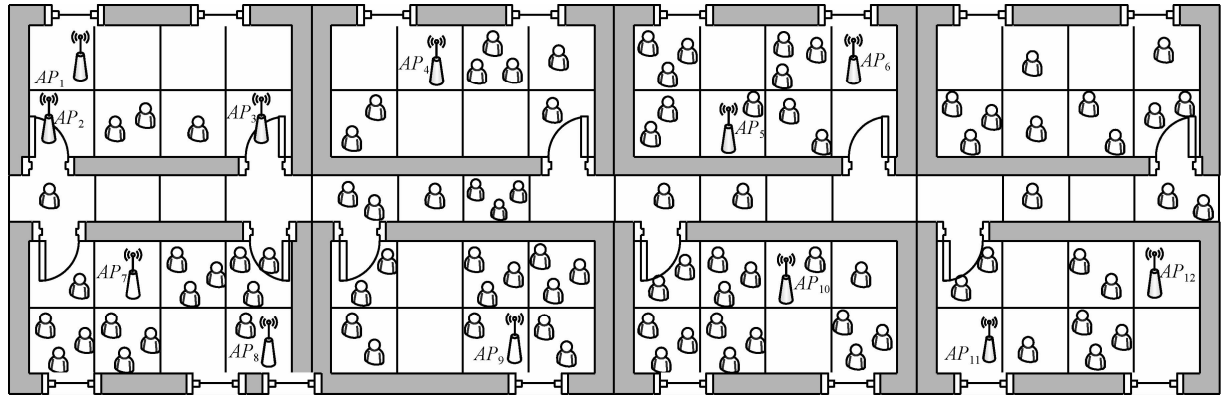


图 2 仿真场景示意

表 2 各参数值

算法	AP 个数	R_{cov}	R_f	R_{QoS}	P_{total}/mW	网络总吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)
文献[5]算法	5	100%	0%	52.5%	500	56.8
本文算法	6	100%	0%	72.5%	275.5	69.5

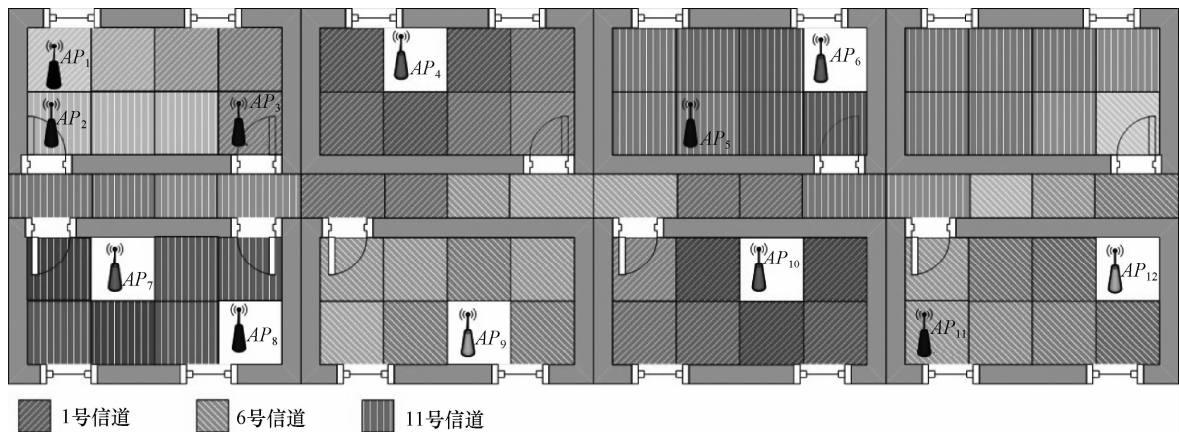


图 3 已选使用的 AP 及其配置的信道

表 3 不同 QoS 需求时 R_{QoS} 的值

QoS 需求/(kbit·s ⁻¹)	联合信道和功率分配算法	联合 AP 规划和信道分配算法	联合 AP 规划、信道和功率分配算法
256	23.8%	60.0%	98.8%
512	20.0%	52.5%	72.5%
768	18.8%	12.5%	36.3%
1 024	12.5%	0	18.8%

图 4 和图 5 分别比较了 3 种算法在用户 QoS 需求不同时网络的总吞吐量和能效, 3 种算法分别为: 联合信道和功率分配算法、文献[5]中的联合 AP 规划和信道分配算法以及本文提出的联合 AP 规划、信道和功率分配算法。联合信道和功率分配算法是指在网络使用所有 AP 时, 依据本文算法流程分配信道

和功率。网络能效定义为消耗单位能量所能成功传输的比特数^[9]。表 3 统计了采用 3 种资源分配算法后网络中达到 QoS 需求的用户比例 R_{QoS} 。仿真数据说明, 提出的新算法不仅可以提高网络总吞吐量, 更好地满足用户的 QoS 需求, 还可以通过干扰管控和功率调整降低网络能耗, 有效地提高网络的能效。

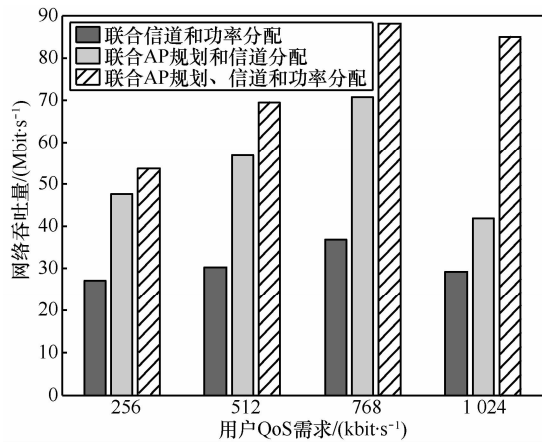


图 4 用户 QoS 需求不同时网络吞吐量性能比较

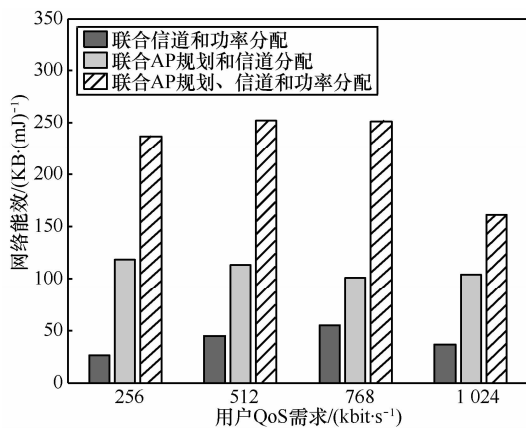


图 5 用户 QoS 需求不同时网络能效性能比较

6 结束语

本文通过多维性能评估构建了密集 WLAN 的资源分配优化目标函数,使用禁忌搜索求解目标函数得到所用 AP、信道和功率的联合分配方案,仿真结果表明,新算法能够提高网络的吞吐量,有效地增加网络的能效,更好地满足用户的业务需求。

参考文献:

[1] RIIHIJARVI J, PETROVA M, MAHONEN P. Frequency allocation for WLANs using graph coloring techniques[A]. Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services[C]. Switzerland, 2005.216-222.

[2] MHATRE V P, PAPAGIANNAKI K, BACCELLI F. Interference mitigation through power control in high density 802.11 WLANs[A]. 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)[C]. Anchorage, AK, 2007.535-543.

[3] ZHENG Z, ZHANG B, JIA X, *et al.* Minimum AP placement for WLAN with rate adaptation using physical interference model[A]. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)[C]. Miami, FL, 2010.1-5.

[4] LEE Y, KIM K, CHOI Y. Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs[A]. 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks[C]. Tampa, Florida, 2002.831-836.

[5] LU J, KATIA J R, GORCE J, *et al.* Indoor WLAN planning with a QoS constraint based on a markovian performance evaluation model[A]. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006(WiMob'2006)[C]. Montreal, Que, 2006.152-158.

[6] LING X, YEUNG K L. Joint access point placement and channel assignment for 802.11 wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(10):2705-2711.

[7] ZHANG J, JIA X, ZHENG Z, *et al.* Minimizing cost of placement of multi-radio and multi-power-level access points with rate adaptation in indoor environment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7):2186-2195.

[8] Two-ray ground reflection model[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/node218.html>.

[9] QIAO D, CHOI S, SHIN K G, *et al.* Interference analysis and transmit power control in IEEE 802.11a/h wireless LANs[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5):1007-1020.

作者简介:



张琦(1988-),男,陕西宝鸡人,西安电子科技大学硕士生,主要研究方向为无线局域网、认知无线网络和无线网络资源管理。



赵林靖(1976-),女,陕西西安人,博士,西安电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为认知无线网络、异构无线网络资源管理。



李建东(1962-),男,江苏阜宁人,博士,西安电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带移动通信、认知无线电和网络、自组织网络、宽带无线 IP 技术。