

融合 QoS 与负载均衡的基础服务集信道分配算法

廖勇^{*①②} 杨士中^① 李平^① 杨宏^① 杨力生^①

^①(重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室 重庆 400044)

^②(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对目前在同一热点区域内高密度部署无线接入点(AP)造成的信道干扰问题, 该文结合同一个基础服务集(BSS)内终端的服务质量(QoS)和 BSS 间的负载均衡的需要, 分析了基于 IEEE 802.11e 的 3 维离散马尔科夫链模型, 并修订了其中竞争窗、退避计数器以及重传次数的量化关系, 完善了该模型, 得到了更为准确的基于 QoS 的终端归一化吞吐量表达式; 其次, 在信道分配设计时, 既考虑了每个 BSS 内终端和 AP 之间通信的 QoS, 又考虑了每个 AP 范围内所有与之关联的终端受到相邻 AP 信道干扰下整体吞吐量的公平性, 并对信道干扰进行了分析, 将信道分配问题建模为一个最优化问题。最后, 通过遗传算法获得了 AP 之间的最优信道分配。数值分析结果表明, 基于公平和服务质量的信道分配方法 CAFQ 与 Hsum 和 CAOTR 算法相比, 可以使 BSS 间的互干扰最小, BSS 内基于 QoS 的吞吐量得到最大的保证, 同时在 BSS 间的负载均衡方面也体现了较好的公平性。

关键词: 无线局域网; 基础服务集; 信道分配; 服务质量; 负载均衡; 离散马尔科夫链

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2230-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00121

Integrated QoS and Load Balance among Basic Service Set for Channel Allocation Algorithm

Liao Yong^{①②} Yang Shi-zhong^① Li Ping^① Yang Hong^① Yang Li-sheng^①

^①(Key Laboratory of Aircraft Tracking Telemetry & Command and Communication,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Wireless Access Points (APs) deployed in the same hotspot with a high density will cause channel interference. Considering this issue, also combined with the QoS of terminals in the same Basic Service Set (BSS) and the load balance among different BSS, a three-dimensional discrete Markov chain model based on IEEE802.11e is analyzed. The quantitative relationship of contention window, backoff counter and retransmission number is revised. Besides, a more accurate normalized terminal throughput expression based on QoS is obtained, and the mentioned model is consummated. Secondly, when designing channel allocation, both the QoS of the communication between the terminals within each BSS and AP and the fairness in overall throughput of the terminals within each AP which associated with it and interfered by adjacent AP channel are considered. Also, modeling analysis of channel interference is adopted and the channel allocation issue is ascribed to an optimization issue. Finally, the optimal channel allocation among AP is obtained by genetic algorithm. Numerical analysis results show, compared with Hsum and Channel Assignment based on the Order of Throughput Reduction CAOTR algorithms, the proposed Channel Assignment based on Fairness and QoS (CAFQ) algorithm based on generic algorithm can minimize the mutual interference among BSS and make a maximum guarantee of the throughput based on QoS within each BSS. Simultaneously, a relatively good fairness in load balance among BSS is obtained.

Key words: Wireless Local Area Network (WLAN); Basic Service Set (BSS); Channel allocation; Quality of Service (QoS); Load balance; Discrete Markov chain

1 引言

随着人们对宽带多媒体业务需求的增长, 无线

局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)扮演着日益重要的角色。由于其具有灵活、简便、易扩展等性能, 被广泛应用于商场、休闲会所、公司等热点场所。但是目前还没有权威的商用 WLAN 部署的规范及信道分配管理标准, 各大运营商在同一个热点区域为了提供高速宽带多媒体业务, 分别都部署了各自的 WLAN 设备, 造成了无线接入点(Access

2012-02-17 收到, 2012-06-06 改回

西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室开放基金(ISN13-11)和中央高校基本科研业务费专项资金(CDJXS11161157)资助课题

*通信作者: 廖勇 liaoy@cqu.edu.cn

Point, AP)的覆盖重复建设,同时高密度 AP 的部署会在有限的频带内产生大量信道干扰,严重影响用户的使用体验,如何有效地配置及优化 AP 信道成为 WLAN 大规模商用必须首先解决的问题之一。

针对 AP 的信道干扰问题,由于类似蜂窝移动通信中的小区干扰问题,已有一些研究成果,主要通过图着色^[1]、整数线性规划^[2]、启发式^[3]等方法为 AP 在 ISM(工业、科学和医疗)频段分配合适的信道,使整体干扰最小。文献[4]采用认知无线电技术,结合主用户频段的使用情况,为 AP 分配可用的主用户信道。但是以上算法都是通过最小化干扰来提高系统的吞吐量,既没有考虑不同业务接入对吞吐量的影响,也没有保障系统的服务质量(QoS)。为保障 WLAN 内不同业务的 QoS 和公平性,文献[5]在文献[6]的 Hsum 算法基础上引入公平性指数,提出 CAOTR(Channel Assignment based on the Order of Throughput Reduction)算法,但是该算法实现的复杂度较高。

近年来,在 WLAN 的研究中又产生了一些新的交叉学科研究方向,文献[7]提出一种基于神经网络的自适应算法,根据应用层的 QoS 需求及物理层的信道状况实时调整数据链路层退避参数。文献[8,9]提出基于博弈论的算法,在吞吐量, QoS, 公平性等限制条件下寻找最优解。但是文献[7-9]中的算法并没有涉及 AP 的信道分配。

综上所述,本文综合考虑基础服务集(Basic Service Set, BSS)间信道干扰, BSS 内 QoS, BSS 间负载均衡等性能指标,采用交叉学科研究的方式,提出一种基于遗传算法的信道分配算法 CAFQ(Channel Assignment based on Fairness and QoS),能在有效地提高系统总吞吐量的同时兼顾系统间吞吐量的公平性。

2 多 AP 共存系统干扰建模

2.1 网络架构

如图 1 所示,每个 AP 和其通信范围内关联的终端构成一个 BSS,在 BSS 内,终端和 AP 之间通过媒体接入控制协议(Media Access Control, MAC)进行通信,AP 之间的通信采用 IAPP(Inter-AP Protocol)协议^[10],其工作原理为:AP 监听相邻 AP 产生的信标,信标中包括信噪比以及接收信号强度等信息,然后 AP 将自己的信息发送给控制器,包括 AP 所在 BSS 内的终端数目等。而控制器得到每个 AP 的信息后会定时测量每个 AP 所在 BSS 内的整体吞吐量信息,进行信道的划分。由于 AP 位置

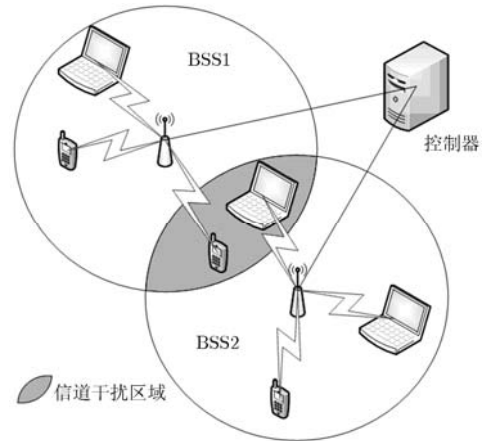


图1 同一热点区域内多 AP 共存下 BSS 间的信道干扰

的不确定性,可能造成两个 AP 所在的 BSS 范围出现部分重叠的情况,在此重叠区域内,如果信道分配不合理,那么就会造成此区域的终端与对应的 AP 进行数据通信时,出现信道干扰问题,特别地,当出现同信道干扰时,甚至会造成终端和 AP 的通信中断。

本文旨在分析 AP 所在 BSS 内所有终端具有 QoS 的吞吐量得到保证的前提下,叠加每个 AP 所受相邻 AP 的信道干扰,并考虑干扰下 BSS 间吞吐量的公平性,进行信道分配。

2.2 基于 QoS 的吞吐量性能分析

在现有 WLAN 基础上,具有 QoS 的性能分析模型较多,最为典型的是文献[11]提出的 IEEE 802.11e 分析模型。本文在分析 QoS 时参考了此文,同时根据其模型中并没有准确表达竞争窗(Contention Window, CW)、重传次数和退避阶段三者之间的相互关系,对三者之间的关系进行了准确的定义,进一步完善了此模型。

定义 $W = CW_{\min}$, m 为从 CW_{\min} 到 CW_{\max} 的重传次数,即 $CW_{\max} = 2^m CW_{\min}$,定义第 i 个退避阶段的 CW 为 W_i , $i=0,1,\dots,L_{\text{retry}}$, L_{retry} 为终端的最大允许重传值,如果终端报文超过该值,那么此报文将被丢弃。

考虑到实际重传次数 i 对 CW 的影响,我们推导出

$$W_i = \begin{cases} 2^i W, & 0 \leq i \leq m-1 \\ 2^m W, & m \leq i \leq L_{\text{retry}} \\ 2^i W, & 0 \leq i \leq L_{\text{retry}}, \text{ 其它} \end{cases}, \quad m \leq L_{\text{retry}} \quad (1)$$

在第 i 个退避阶段,每个终端的退避计数器是

从 $[0, W_i-1]$ 中的均匀分布中选取的一个伪随机整数。

我们参照文献[11], 采用 3 维离散马尔科夫链模型表征 IEEE 802.11e BSS 模式下终端接入信道的过程。在 BSS 内, 有 M 个固定的终端, 每个终端有多个不同的接入类别 AC(Access Category), 用 AC_i ($i=0,1,2,3$)表示, 数值越大, 其业务优先级越高, 最多为 4 类, 分别是背景(AC_BK, AC_0), 尽力而为(AC_BE, AC_1), 视频(AC_VI, AC_2)和音频(AC_VO, AC_3)。每个终端都处于饱和状态, 即一直有报文发送。在时刻 t , 每个终端的 AC 的状态由 (j,k,d) 3 个参数确定, j 表示退避阶段的重传次数, $j = -2, -1, 0, 1, \dots, L_{\text{retry}}$; k 表示退避计数器, 其值的范围为 $[0, W_j-1]$; d 表示接入信道剩余时间, 详细解释见文献[11]。笔者修订了 MAC 重传次数的 3 维马尔科夫链模型如图 2 所示, 其转移概率和稳态概率的求解详见文献[12]。

其中 N 表示 AC 平均挂起延迟时间, A 表示每个 AC 的仲裁间隔时间, T_c 表示碰撞时间, T_s 表示传输报文成功的时间, p_b 表示探测到信道忙的概率, p_i 表示 AC_i 的条件碰撞概率, W_j 表示第 j 次退避时的竞争窗。

基于以上马尔科夫链模型, 我们得到终端内 AC_i 的归一化吞吐量为

$$\begin{aligned} \text{THR}_i &= \frac{p_{si}E[P]}{E[I] + \sum_{i'=0}^3 p_{si'}(T_s + \text{AIFS}[AC_{i'}]) + \left(1 - \sum_{i'=0}^3 p_{si'}\right)T_c} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 P 表示负载的长度, $E[I]$ 表示在传输前平均的空闲时隙数, p_{si} 和 $p_{si'}$ 表示 AC_i 和 $AC_{i'}$ 的条件成功传输概率, $\text{AIFS}[AC_{i'}]$ 表示 $AC_{i'}$ 的 AIFS 占用的时隙数。

2.3 信道干扰模型

得到每个终端的吞吐量之后, 我们将对 AP 所在的 BSS 之间的干扰进行量化计算。

为便于分析, 我们进行一些前提假设:

- (1) 不考虑快速衰落信道, 并且信道是稳定的, BSS 之间的信道干扰是造成丢包的主要因素。
- (2) 只考虑两个 AP 之间的重叠区域, 3 个或更多 AP 之间叠加的重叠区域暂不考虑。
- (3) MAC 数据传输方式采用的是 DATA/ACK 机制。这样在实际的使用中, 系统会出现“隐藏终端”和“暴露终端”, 而它们对系统吞吐量有较大影响。

如图 1 所示, 设定控制器可以控制的 AP 数目

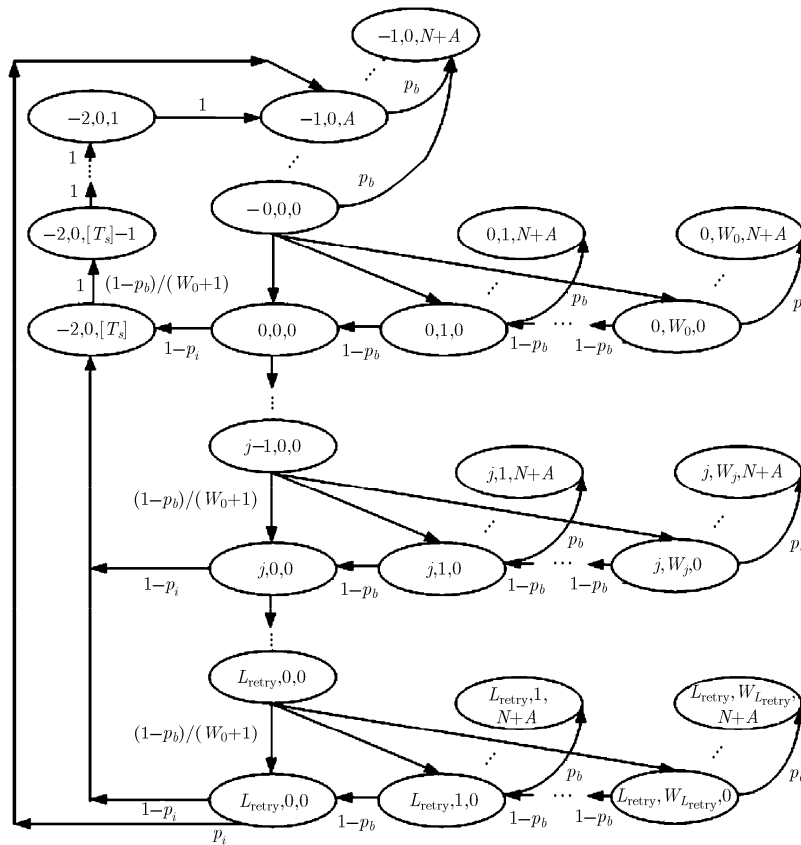


图 2 终端内单个 AC 的 3 维离散马尔科夫链模型

为 L 个, 即 AP 的集合 $C=\{AP_1, AP_2, \dots, AP_L\}$, AP_j 是 AP_i 相邻的 AP 之一。

同时, 如图 3 所示, 我们设置 AP_i 所在 BSS 内所有关联的终端数目为 P , 其中有 M 个终端位于 (AP_i, AP_j) 的重叠区域内且与 AP_i 进行关联, 在此区域内, 有 N 个终端与 AP_j 关联。

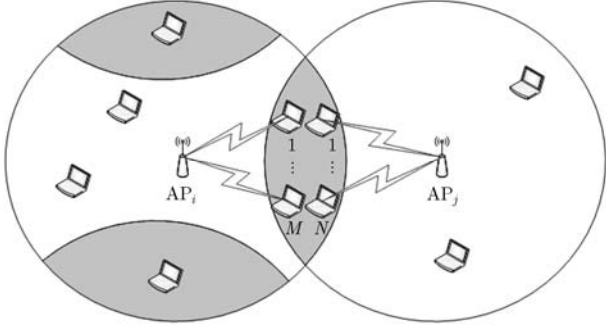


图 3 BSS 之间重叠区域干扰模型

设置信道的集合为 $F=\{f_1, \dots, f_k\}$, 定义信道分配函数为 $X=\{x_i\}(i=1, \dots, L)$, 如果信道 f_k 分配给第 i 个 AP, 那么有 $x_i=f_k(1 \leq i \leq L, 1 \leq k \leq K)$ 。

AP_j 对 AP_i 的干扰程度由干扰惩罚 $IP_{i,j}(f_i, f_j)$ 来确定, 其定义为

$$IP_{i,j}(f_i, f_j) = (A_{ij}/A_i) \times \rho(f_i, f_j) \quad (3)$$

$$\rho(f_i, f_j) = \max(1 - 1/O \times |f_i - f_j|, 0) \quad (4)$$

A_{ij} 表示 AP_j 的干扰区域和 AP_i 的通信区域重叠的区域, A_i 表示 AP_i 的通信区域, $\rho(f_i, f_j)$ 表示信道重叠因子, O 是正交信道间隔数, 对 ISM 频段而言, 由于正交信道为 1, 6 和 11 信道, 其 $O=5$ 。

$S_{i,j}$ 表示在 (AP_i, AP_j) 重叠区域内与 AP_i 关联的 M 个终端的吞吐量, 那么可得

$$S_{i,j} = \sum_{k=1}^M THR_k \quad (5)$$

THR_k 表示在 (AP_i, AP_j) 重叠区域内与对应 AP 关联通信的终端的归一化吞吐量。

对于每个 AP 而言, 其通信范围内受到相邻 AP 的干扰, 定义信道干扰下整体衰减吞吐量的表达式为

$$R_i = \sum_{j=1, j \neq i}^L IP_{i,j} S_{i,j} \quad (6)$$

显然, 在扩展服务集(Extended Service Set, ESS)内一共有 L 个 AP 共存的情况下, AP_i 要计算受到 $L-1$ 个相邻的 AP 信道干扰造成的吞吐量衰减。

2.4 问题描述

通过以上的分析, 我们可以计算出每个 BSS 内

在受到信道干扰后的实际吞吐量, 为了能有效地均衡 BSS 之间的吞吐量, 本文引用著名的 Jain 公平指数^[13]作为衡量 BSS 间吞吐量公平性的标准。

Jain 公平指数表达式为

$$\vartheta = \left(\sum_{i=1}^L t_i \right)^2 / \left(L \sum_{i=1}^L t_i^2 \right) \quad (7)$$

式中 t_i 表示 AP_i 归一化的吞吐量, 我们可知, 每个 AP 所在的 BSS 内的实际吞吐量为

$$t_i = \sum_{k=1}^P THR_k - R_i \quad (8)$$

联立式(2)和式(6)可求得 t_i 。当 t_i 趋近相同时, ϑ 趋近于 1; 而当 t_i 相差较大时, ϑ 趋近于 $1/L$ 。

至此, 我们可以将信道分配问题归结为一个最优化问题, 目标函数是信道分配函数 $X=\{x_i\}$, 限制条件为

$$\begin{aligned} & \min_X \left\{ \sum_{i=1}^L \sum_{j=1, j \neq i}^L IP_{i,j} S_{i,j} \right\} \\ & \max_X \left\{ \left(\sum_{i=1}^L t_i \right)^2 / L \sum_{i=1}^L t_i^2 \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

信道分配的目的是让重叠区域内信道干扰最小, 而 BSS 内吞吐量尽可能的大并且尽可能的让 Jain 公平性指数趋近于 1。

3 基于遗传算法的信道分配设计

为了合理求解目标信道分配函数的最优解, 我们引入遗传算法^[14]来求解分配给 AP 的最优信道。

遗传算法为经典的仿生算法, 模拟自然界对生物的选择过程, 以优胜劣汰的方式选择适应性强的个体繁殖后代, 以杂交、变异的方式形成新的解空间, 最终得到问题的最优解。AP 对应于染色体内的构造基因, AP 的序号对应于基因的序号。

3.1 适应性函数

要得到最优解, 首先要构建适应性函数。适应性函数表征个体对限制条件的适应性, 较大函数值的个体对限制的适应性较好。信道分配中存在两个优化因子: AP 衰减吞吐量 R_i 和公平性指数 ϑ , 要求衰减吞吐量尽可能小, 即趋近于 0, 公平性指数尽可能大, 即趋近于 1。设计适应性函数为

$$fit = k_1 / \left(\sum_{i=1}^L W_i + 1 \right) + k_2 \vartheta \quad (10)$$

其中 k_1, k_2 为两个因子的权重, 满足如下条件:

$$k_1 + k_2 = 1, \quad k_1 \geq 0, \quad k_2 \geq 0 \quad (11)$$

个体被选中交叉、变异的概率为

$$p_i = \text{fit}(i) / \left(\sum_{j=1}^L \text{fit}(j) \right) \quad (12)$$

3.2 算法伪代码

算法的伪代码如表 1 所示。

表 1 算法的伪代码

算法 1	
输入:	a graph of APs with the No. of each AP
输出:	an assigned channel for each AP
(1)	Initial a population with different individual
(2)	Calculated fitness for each individual
(3)	Let gen=0
(4)	While gen<GMAX do
(5)	Assign a probability for each individual according to formula (12)
(6)	Select many pair of the individual using the roulette method
(7)	Crossover each pair of individual
(8)	Select many individual using the roulette method
(9)	Mutation each individual
(10)	Calculated fitness for each individual
(11)	Choose the right individual to form a new population
(12)	gen=gen++
(13)	End while

算法输入为 $G(V,E)$, V 为 AP 的标号, E 为具有互干扰的 AP 之间的连线。首先随机为各 AP 分配信道, 生成不完全相同的一组分配结果组成一个种群, 计算种群内每一个个体的适应性函数值, 初始化迭代次数为 0。当迭代次数小于预定义的最大迭代次数时, 根据式(12)计算个体的选中概率, 使用轮盘赌^[15](轮盘赌是一种回放式随机采样方法, 每个个体进入下一代的概率就等于 p_i , 每一个个体就像圆盘中的一个扇形部分, 扇形的角度与个体的适应性函数值成正比, 随机拨动圆盘, 当圆盘停止时指针所在扇面对应的个体被选中)方法选择个体对

进行交叉处理, 使用轮盘赌方法选择单个个体进行变异处理, 淘汰适应性较差的个体, 更新种群和迭代次数。

4 数值分析

为了进一步验证 CAQF 算法的有效性, 我们在 Matlab 平台上进行了数值分析。为说明算法性能, 将 CAFQ 算法与 Hsum 算法^[5]和 CAOTR 算法^[6]进行比较。

仿真拓扑如图 1 所示, 仿真主要参数如下: 负载长度、PHY 头(长前导)、MAC 头和 ACK 分别为 1000 byte, 24 byte, 28 byte 和 14 byte, ACK 超时模式为 DIFS+ACK, 数据速率和基本速率分别为 11 Mbps 和 1 Mbps, 1 个时隙(Slot)为 9 μ s, SIFS 和 DIFS 分别为 16 μ s 和 38 μ s, 有 2 种业务类型 AC₂ 和 AC₃, AIFS 分别为 5 Slot 和 3 Slot, 系统工作频段为 ISM 2.4 GHz, 信道数 $K=11$, 正交信道间隔数 $O=5$, AP 个数 $L=10$, 终端数目为 20-80 个。

选取 BSS 内系统吞吐量和 BSS 间的 Jain 公平性指数作为评价算法性能的主要指标。

图 4 为 WLAN 下不同数目的客户端的归一化吞吐量, CAOTR 算法引入了各 AP 下吞吐量的公平性, 提高了 AP 性能的平均利用率, 所以在不同接入客户端数目下, CAOTR 的归一化吞吐量均优于 Hsum 算法, CAFQ 算法使用遗传算法强大的搜索性能, 优化效果好于 CAOTR。随着接入客户端的增多, CAFQ 和 CAOTR 公平性的优势进一步凸显, 归一化吞吐量的明显高于 Hsum 算法, 在客户端数为 60 时, Hsum 的归一化吞吐量为 0.351, CAOTR 的归一化吞吐量为 0.364, 比 Hsum 算法对应的吞吐量提高了 3.7%, CAQF 的归一化吞吐量为 0.372, 比 CAOTR 提高了 2.2%, 比 Hsum 提高了 6.0%。

图 5 为不同数目客户端下的公平性指数, CAOTR 算法增加了公平性限制条件, 因此信道分配结果的公平性指数高于 Hsum 算法, CAFQ 算法

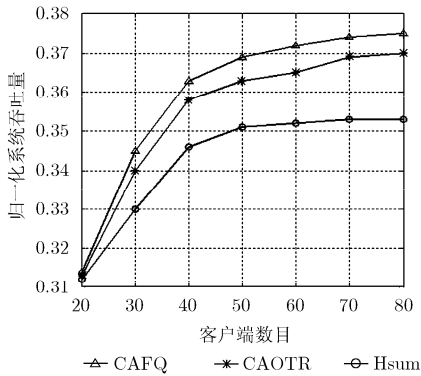


图 4 归一化吞吐量对比

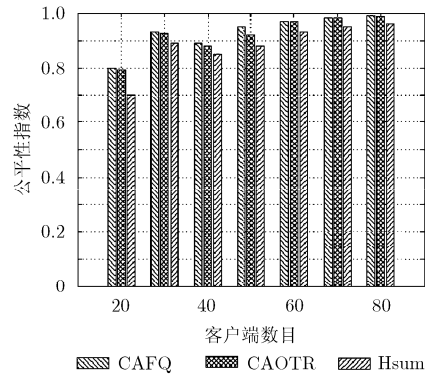


图 5 公平性指数对比

具有更强的优化搜索性能, 公平性指数在某些情况下略高于 CAOTR 算法。特别地, 当客户端数为 50 时, CAOTR 算法的公平性指数比 Hsum 提高了 4.5%, CAFQ 算法比 CAOTR 提高了 3.3%, 比 Hsum 提高了 7.8%。而从整体性能上看, CAOTR 比 Hsum 算法公平性指数平均提高了 4.8%, CAFQ 比 CAOTR 提高了 0.9%, 比 Hsum 提高了 5.7%。

5 结束语

本文针对工作在 ISM 频段的无线 AP 共存同一热点区域内出现的信道干扰问题进行了深入讨论, 并完善了基于 QoS 的 WLAN 吞吐量分析模型, 并对 BSS 内活跃终端受到的相邻 AP 的干扰进行了数学建模分析, 将信道分配问题归结为最优化问题, 借鉴遗传算法思想进行了信道分配设计, 并将其与另外两种信道分配算法进行了对比, 得出所提算法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] Amaldi E, Bosio S, Malucelli F, *et al.* Solving nonlinear covering problems arising in WLAN design[J]. *Operations Research*, 2011, 59(1): 173-187.
- [2] Yue Xiao-nan, Wong Chi-fai, and Gary Chan S H. CACAO: distributed client-assisted channel assignment optimization for uncoordinated WLANs[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(9): 1433-1440.
- [3] Farsi A, Achir N, and Boussetta K. Heuristic approaches for access points deployment and frequency assignment in WLANs[C]. Global Information Infrastructure Symposium, IEEE Computer Society: Da Nang, Viet nam, 2011: 1-7.
- [4] Novillo F, Churchman M, Ferrús R, *et al.* A channel allocation algorithm for OSA-enabled IEEE 802.11 WLANs [C]. Proceedings of the 2009 6th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS'09, IEEE Computer Society, Tuscany, Italy, 2009: 468-472.
- [5] Zhang Heli, Ji Hong, and Ge Wen-dong. Channel assignment with fairness for multi-AP WLAN based on distributed coordination function[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Cancun, Mexico, 2011: 392-397.
- [6] Mishra A, Banerjee S, and Arbaugh W. Weighted coloring based channel assignment for WLANs[J]. *Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*, 2005, 3(11): 19-31.
- [7] Wang C, Lin T, and Chen J L. A cross-layer adaptive algorithm for multimedia QoS fairness in WLAN environments using neural networks[J]. *IET Communications*, 2007, 1(5): 858-865.
- [8] Du K L, Swamy M N S, and Ni Qiang. A dynamic spectrum access scheme for cognitive radio networks[C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE '09, IEEE, St. John's, NL, Canada, 2009: 450-454.
- [9] Mohammad R J and Ahmad R S. Efficient and distributed SINR-based joint resource allocation and base station assignment in wireless CDMA networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59 (12): 3388-3399.
- [10] Zhu Y, Zhou Z, Tan B, *et al.* Leveraging multi- AP diversity for transmission resilience in wireless networks: architecture and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(10): 5030-5040.
- [11] Kong Z N, Tsang D H K, Bensaou B, *et al.* Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(10): 2095-2106.
- [12] 廖勇, 杨士中, 王丹. 泊松分布站点 TCP 流在 WLANs 中的吞吐量分析与验证[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(6): 92-97, 104. Liao Yong, Yang Shi-zhong, and Wang Dan. Analysis and verification of TCP goodput of poisson distribution station over WLANs[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(6): 92-97, 104.
- [13] Jain R, Durrresi A, and Babic G. Throughput fairness index: an explanation[C]. Proc. ATM Forum/99-0045:[s.n.], 1999.
- [14] Yang Yu and Yu Xin-jie. Cooperative coevolutionary genetic algorithm for digital IIR filter design[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(3): 1311-1318.
- [15] Hameed M A, Ramachandram S, and Jadaan O A. Information gain clustering through roulette wheel genetic algorithm (IGCRWGA): a novel heuristic approach for personalisation of cold start problem[C]. International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), IEEE Computer Society, Gwalior, India, 2011: 470-475.

廖勇: 男, 1982年生, 博士生, 讲师, 主要研究领域为宽带无线移动通信。

杨士中: 男, 1937年生, 中国工程院院士, 博士生导师, 教授, 主要研究领域为宽带无线网络通信、测控及遥感信息传输。

李平: 男, 1986年生, 硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信。

杨宏: 女, 1989年生, 硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信。

杨力生: 男, 1972年生, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为宽带无线通信。