

基于用户分配和负载的频谱分配算法*

陈剑¹, 吴建平², 李贺武³

¹(解放军理工大学 指挥自动化学院, 江苏 南京 210007)

²(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

³(清华大学 信息网络工程研究中心, 北京 100084)

通讯作者: 陈剑, E-mail: netsavage@163.com

摘要: 提出了一种基于用户分配和负载的频谱分配算法. 该算法包括两部分: 用户分配子算法和频谱分配子算法. 用户分配子算法首先基于聚类划分理论, 使分配到相同访问点下的用户具有相近的信噪比, 缓解了无线接入网络中普遍存在的远近效应问题. 在该用户分配基础上, 频谱分配子算法根据各访问点的负载及其关联用户信噪比的平均值计算最优频谱分配. 该算法具有可实现性、多项式时间的计算复杂度以及比例公平性. 真实数据驱动的仿真实验结果表明, 该算法能够有效地提高系统吞吐量, 同时大幅度减小访问点的报文缓冲区队长.

关键词: 用户分配; 关联控制; 频谱分配; 动态频谱访问; 负载

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

中文引用格式: 陈剑, 吴建平, 李贺武. 基于用户分配和负载的频谱分配算法. 软件学报, 2013, 24(7): 1638-1649. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4312.htm>

英文引用格式: Chen J, Wu JP, Li HW. Spectrum allocation algorithm based on user allocation and load. Ruan Jian Xue Bao/ Journal of Software, 2013, 24(7): 1638-1649 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4312.htm>

Spectrum Allocation Algorithm Based on User Allocation and Load

CHEN Jian¹, WU Jian-Ping², LI He-Wu³

¹(Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

²(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

³(Information Networks Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Corresponding author: CHEN Jian, E-mail: netsavage@163.com

Abstract: A spectrum allocation algorithm based on user allocation and load is proposed which includes two parts: User allocation sub-algorithm and spectrum allocation sub-algorithm. Based on the theory of cluster partitioning, an user allocation sub-algorithm is designed. This makes the users associate the same access point with similar signal noise ratios; therefore, this alleviates the popular near-far problem of wireless access network. Then, based on the user allocation results, a spectrum allocation sub-algorithm is designed for optimizing the spectrum allocation according to the load of each access point and the mean value of signal noise ratios of its associated users. The proposed algorithm is realizable, and has polynomial computation complexity and proportional fairness. The trace-driven simulations show that the system throughput is improved efficiently and the length of packet buffer is decreased profoundly by the proposed algorithm.

Key words: user allocation; association control; spectrum allocation; dynamic spectrum access; load

无线频谱资源日益紧张, 已经难以满足目前及将来的无线网络的业务需求, 成为制约无线网络发展的重大

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320500); 国家科技重大专项(2011ZX03002-002_02, 2012ZX01039-003, 2012ZX03002015-003); 军用网络技术实验室创新开放基金(2012002)

收稿时间: 2011-10-27; 定稿时间: 2012-08-17

瓶颈.实验和研究表明^[1],在现有的固定频谱分配体制下,大多数频谱资源的平均利用率低于 5%,这与无线网络发展的频谱资源短缺形成了鲜明对比.动态频谱访问(dynamic spectrum access,简称 DSA)^[2]是目前解决频谱资源匮乏问题的主要研究方向,也是热点研究领域.动态频谱访问是指通信终端可以机会地使用目前未被其授权用户使用的空闲频谱,但不能对现有的邻近授权用户造成干扰.具有动态频谱访问能力的通信终端,可以根据无线网络状况动态地调整其通信信道的中心频率和频谱宽度.

有效的频谱分配是动态频谱访问的关键技术难点问题,已有的研究成果^[3-5]主要通过信道负载来动态优化频谱分配.然而,进一步的研究结果表明^[6],单纯根据负载优化频谱分配是低效的,在实际的网络环境下,可能会产生适得其反的效果.远近效应问题是无线接入网络中普遍存在的,距离访问点(access point,简称 AP)较远的用户信噪比(signal noise ratio,简称 SNR)较低,传输速率比靠近 AP 的用户要低,在随机访问接入的机制下占用信道的时间较长,挤占了较近用户的传输时间.因此,远近效应也是造成 AP 负载加重的原因之一.基于负载的频谱分配算法并不区分负载产生的原因,对于远近效应造成的负载增加,更宽的信道并不一定能够改善系统性能.

本文解决的核心问题是,如何对用户分配和频谱分配进行整体考虑和设计,以减轻远近效应对频谱分配的影响,同时优化频谱分配,提升系统性能.针对该问题,提出了一种基于用户分配和负载的频谱分配算法.该算法基于聚类划分理论调整用户与 AP 的关联关系,使分配到相同 AP 下的用户具有相近的 SNR,进而缓解远近效应问题.在此用户分配基础上,算法再根据各 AP 的负载及其关联用户信噪比的平均值计算最优频谱分配.真实数据驱动的仿真实验结果表明,该算法能够有效地提高系统吞吐量,同时大幅度减小 AP 的报文缓冲区队长.

本文第 1 节简要介绍用户和频谱分配研究的相关工作.第 2 节详细描述系统模型和需要解决的问题.第 3 节给出算法的细节描述,并对可实现性和计算复杂性进行简要的讨论和分析.第 4 节针对仿真结果进行分析和比较.

1 相关工作

本文中的用户分配是指通过改变用户与 AP 之间的关联,调整用户与 AP 之间的从属关系.Bejerano 等人针对无线局域网,通过关联控制实现了一种具有公平性和负载均衡的用户分配算法^[7].该算法通过改变用户关联 AP 的准则(当前多数用户采用最强 SNR 作为关联准则),智能地调整用户与 AP 的关联,缓解 AP 间的负载不均衡问题.同时,算法采用最大-最小公平性模型优化系统吞吐量,在保证公平性的前提下最大化系统吞吐量.文献 [8-10]提出了一些其他用户关联准则,其中包括 AP 当前已关联的用户数、已关联用户的平均 SNR 以及 AP 负载等.此外,Balachandran 等人提出了一种能够缓解拥塞和具有服务质量保证的启发式算法^[9],该算法将用户关联到满足用户最小带宽需求的 AP 上,若有多个 AP 符合要求,则选择 SNR 最强的.Kumar 等人提出一种最优化网络效用的用户分配算法^[11],该算法假定用户可以同时关联多个 AP,从每个 AP 处获取一定的吞吐量并计算相应的网络效用值,通过最优化总的网络效用值计算出最优用户分配解.以上研究工作虽然在优化 AP 间的负载均衡、公平性和系统吞吐量等方面提出了具体的解决方案,但是针对无线网络中普遍存在的远近效应问题却并没有做过多的考虑.由于远近效应的影响,较远用户随着流量的增加对 AP 负载的增加是非线性的,因此,上述研究工作的模型和算法在实际网络环境中很难取得预期的优化效果.

频谱分配是动态频谱访问技术中的热点研究问题,目前,具有典型代表性的工作有:Yuan 等人针对无线多跳网络提出了一种基于时间频谱块的频谱分配算法^[3],该算法根据用户的频谱需求和使用时间动态地调整信道频谱宽度,同时满足分配的比列公平性;Yang 等人基于软件无线电,设计和实现了一种支持分布式动态频谱分配的链路层协议^[4],通信终端通过该协议协商空闲频谱的使用,根据流量需求选择相匹配的频谱带宽;Moscibroda 等人提出了一种基于 IEEE 802.11 局域网的负载感知的分布式频谱分配算法^[5],该算法将信道频宽分成几个离散等级,根据 AP 负载动态调整信道频宽等级.实验结果表明,与固定信道频宽法相比,该算法能够有效提升系统性能并缓解 AP 间的负载不均衡问题;Rayanchu 等人针对集中式企业无线网络提出了一种报文传输调度和频谱分配联合优化算法^[6],该算法通过构建链路冲突模型,预测不同信道频宽组合下的网络并发传输容量,结合报文传输调度的优化,可以大幅度提升系统吞吐量;Chen 等人针对集中式的无线网络,提出一种速率

控制和频谱分配联合解决方案^[12],该方案通过引入虚拟子网队长的概念来衡量 AP 负载,据此调整 AP 的信道频宽,结合传输速率控制,在优化系统吞吐量的同时缩短传输时延。

与上述研究工作不同,本文将用户分配和频谱分配问题作为整体来加以考虑,在用户分配上,重点解决远近效应对频谱分配的影响问题,在优化的用户分配结果之上,根据 AP 负载及用户 SNR 均值优化频谱分配.通过用户分配和频谱分配的整体考虑和设计,可以进一步提升动态频谱分配的优化性能。

2 模型及问题描述

2.1 系统模型

本文工作主要针对集中式无线局域网(目前大部分企业无线网络和校园无线网络所采用的网络结构),主要包括 3 个组件:控制器、AP 和用户.本文使用三元组 $G=(M,A,C)$ 来表示集中式的无线接入网络,其中, M 表示控制器, $A=\{a_1, \dots, a_n\}$ 表示 AP 集合, $C=\{c_1, \dots, c_k\}$ 表示无线用户集合, $|A|$ 代表总的 AP 个数, $|C|$ 代表总的用户数,所有关联在 AP a 下的用户采用集合 $u(a)$ 表示.我们假定 AP 位置固定,用户符合准静态模式,即用户可以移动,但在同一位置会停留较长时间,这一假定与大多数无线网络使用的实际情况相符^[13].

在报文传输中,AP 为每个与其关联的用户维护一个缓冲报文队列. $q_{a,c}$ 表示 AP a 为用户 c 缓冲的报文队列长度,其值反映出了用户 c 对 AP a 产生的负载大小.AP 周期性地通过公共控制信道测量其与所有用户之间的 SNR(测量方法见第 3.2 节),并将测量到的 SNR 和报文缓冲区队长等状态数据通过以太网传输到控制器,控制器根据接收到的状态数据生成全局的 SNR 矩阵 $\{SNR_{a,c}|a \in A, c \in C\}$ 及队长矩阵 $\{q_{a,c}|a \in A, c \in C\}$. 用户入网时主动进行信道扫描,通过侦听和接收各信道的信标消息 (beacon message) 来标识 AP, 并选择信标消息 SNR 最高的 AP 进行关联. 当收到 AP 的解关联操作报文 (dis-association) 时, 用户解除与此 AP 的关联, 启动主动扫描过程, 并从扫描结果中选择 SNR 最高的 AP 关联. 此外, 根据用户与 AP 的关联结果, 定义 $U=\{u(a)|a \in A\}$ 为一个用户分配解.

整个可用的连续频谱采用 $W(f_{top}, f_{bot}, bw)$ 表示, 其中, f_{top} 代表频谱下界, f_{bot} 代表频谱上界, bw 代表整个可用频谱空间大小. 在本文中, 信道是指在一个网络拓扑中连接两个节点的链路, 频谱分配是指如何分配频谱到连接 AP 和用户之间的信道上, 因此, 与 IEEE 802.11 标准^[14] 所定义的信道不同, 本文所采用的信道是一种具有可变频谱宽度的信道. 定义 $F=\{(f_{top}(a), f_{bot}(a), w(a))|a \in A\}$ 为对所有 AP 的频谱分配解, 其中, $f_{top}(a)$ 表示分配给 AP a 的频谱上界, $f_{bot}(a)$ 为频谱下界, $w(a)$ 为频谱宽度. 本文采用无冲突的信道分配模型, 即相干扰的 AP 之间采用非相干的信道. 频谱段被分割成很多细小的相互正交频带, 通过将这些细小的频带分配到不同的信道, AP 之间可以频分复用 (frequency division multiple access, 简称 FDMA) 的方式相互正交访问.

2.2 问题描述

传统的固定频宽的信道分配算法优化系统吞吐量的主要方法是将干扰较小的信道优先分配给负载较重的 AP, 并尽量减少 AP 之间的干扰, 但实践和研究结果^[5,6] 都表明, 此方法的优化效果有限. 基于动态频谱访问的频谱分配算法, 则根据 AP 的负载不同, 动态地调整各信道的频谱宽度. 尽管通过动态频谱分配技术可以有效地缓解 AP 间的负载不均衡问题并提升系统吞吐量, 但由于远近效应的影响, 实际网络环境中很难取得预期的优化效果. 实际网络中, 远近效应形成的主因是, 在用户入网时, 由于短时的隐藏终端、干扰、竞争冲突、多径效应以及移动障碍物导致的信道衰变等多种因素, 造成用户无法扫描或关联到距离最近或 SNR 最好的 AP. 在用户关联到较远 AP 之后, 只有当 SNR 低于一个相当低的阈值时, 才会触发新的信道扫描和关联操作.

为了更清晰地说明问题, 我们通过图 1 进行更细致的分析和比较. 固定频宽的频谱分配算法如图 1(a) 所示, AP₁ 和 AP₂ 之间的关联用户数和负载具有较大差距, 但所采用的信道 CH₁ 和 CH₂ 具有相同的宽度. 这一方法存在负载不均衡问题. 同时, 用户 C₈ 对 AP₁ 造成的远近效应无法通过频谱分配消除. 图 1(b) 所示的基于动态频谱访问的频谱分配则能根据 AP 负载调整 CH₁ 和 CH₂ 的宽度. 假如 AP₁ 的负载大于 AP₂, 增加 CH₁ 的信道宽度, 进一步降低用户 C₈ 的 SNR, 加剧远近效应. 本文所提基于用户分配和负载的频谱分配算法优化效果如图 1(c) 所示, 消除了图 1(a) 和图 1(b) 中存在的负载不均衡和远近效应问题, 系统性能得到了有效的优化.

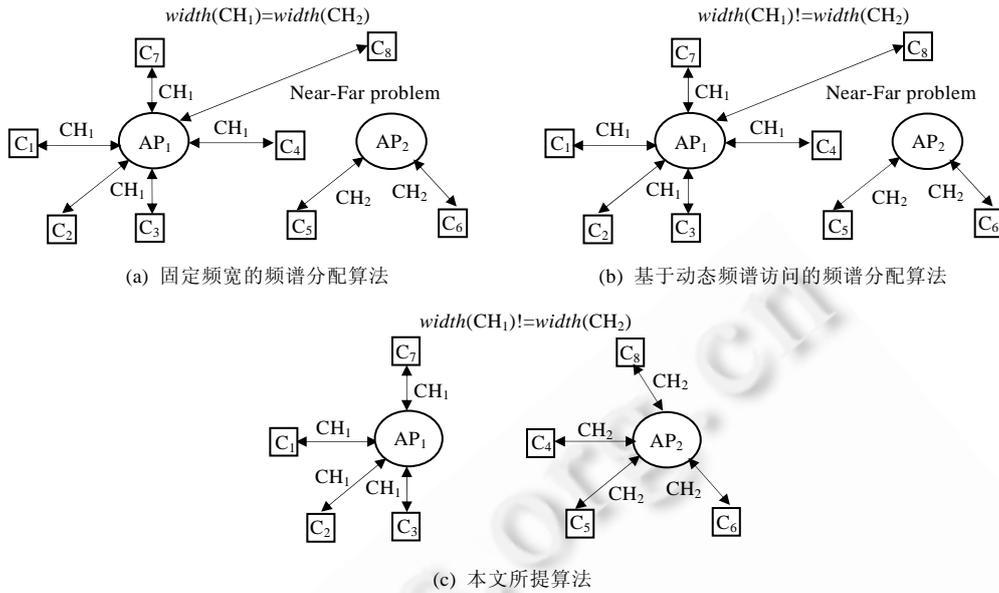


Fig.1 Comparison of spectrum allocation algorithm

图 1 频谱分配算法比较

下面我们将对上述问题进行形式化的描述,建立问题模型.本文研究的主要目标是从用户和频谱的多维分配空间中,找到最优的分配解,以提升系统性能,其形式化优化问题描述如下所示:

$$FIND\{u(a), \langle f_{top}(a), f_{bot}(a), w(a) \rangle\}_{a \in A} \text{MAX} \sum_{a \in A} NUM(w(a)) \tag{1}$$

$$\text{s.t. } I(a) = \emptyset, \text{ for } a \in A \tag{2}$$

$$\sum_{a \in A} |u(a)| = |C|, \text{ for } a \in A \tag{3}$$

$$u(a) \cap u(b) = \emptyset, a \neq b \tag{4}$$

$$\cup \langle f_{top}(a), f_{bot}(a), w(a) \rangle \subseteq W \tag{5}$$

$$\sum_{a \in A} \frac{w'(a) - w(a)}{w(a)} \leq 0 \tag{6}$$

公式(1)为目标函数,其中,NUM(w(a))表示 AP a 的网络效用函数.约束条件(2)中的 I(a)表示 AP a 干扰范围内的 AP 集合,由于本文采用无冲突的信道模型,因此,所有 AP 的干扰集合必须为空.约束条件(3)和约束条件(4)表示所有用户能且只能同时关联一个 AP.约束条件(5)表明,所有 AP 分配的频谱并集必须属于整个可用频谱空间.约束条件(6)采用文献[15]对比例公平性的定义,{w'(a)}_{a \in A} 表示另外一个可行分配解,只要公式(6)的值小于等于 0,则解{w(a)}_{a \in A} 满足比例公平性.文献[15]证明,若效用函数采用对数函数,即 log(w(a)),则可以获得约束条件(6)所需的比例公平性,因此我们设定目标函数中的网络效用函数 NUM(w(a))=log(w(a)) * l(a),其中,l(a)为 AP a 的负载函数(函数描述见第 3.1 节).

上述优化问题是一个约束的非线性优化问题.文献[16]表明,此类问题能够规约成具有干扰约束的最大权重匹配问题,并证明此问题是一个 NP 难问题.

3 基于用户分配和负载的频谱分配算法

为了有效地解决上述 NP 难问题,本文提出一种基于用户分配和负载的频谱分配算法以联合解决远近效应和负载感知问题.本算法运行于控制器之上,包含用户分配子算法和频谱分配子算法两部分,详细的算法数据流

如图 2 所示.用户分配子算法首先根据周期性采集到的状态数据,如信噪比矩阵 $\{SNR_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$ 及队长 $\{q_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$,利用聚类划分法,使分配到相同 AP 的用户具有相近 SNR.频谱分配子算法在生成的用户分配基础上,再根据各 AP 负载及其关联用户信噪比的平均值进行负载感知的频谱分配.最后,控制器通过以太网,根据新生成的用户分配解和频谱分配解调整 AP 的相关运行参数.

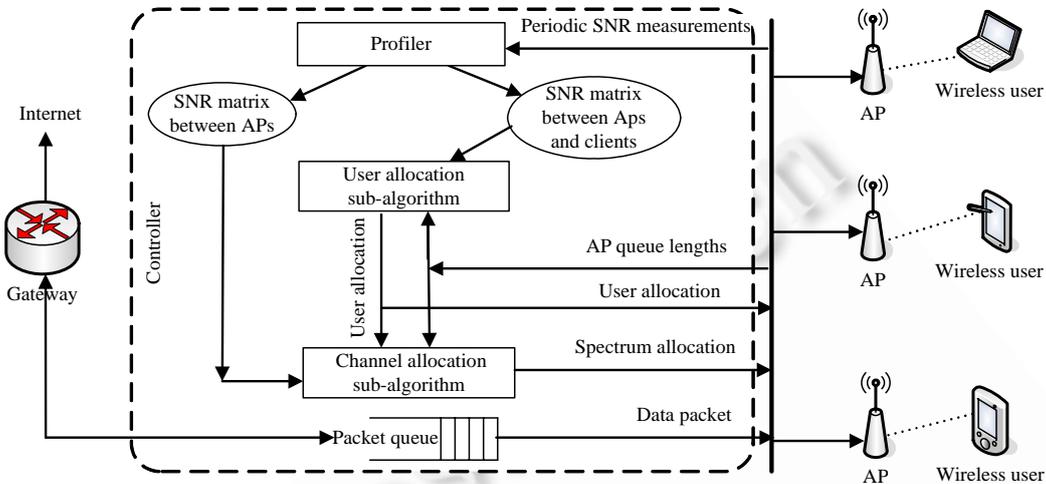


Fig.2 Data flow chart of algorithm

图 2 算法数据流图

3.1 算法描述

3.1.1 用户分配子算法

用户分配子算法的目标就是最大限度地减轻远近效应.产生远近效应的根本原因在于,关联在同一 AP 的用户具有较大的 SNR 差异,因此,要减轻远近效应,最有效的办法就是降低 SNR 差异,使同一 AP 的用户具有相近的 SNR.基于此思想,本文提出一种基于聚类的用户分配子算法,采用数据挖掘中的聚类划分法^[17],将用户划分到相应的 AP,使同一 AP 的用户具有聚类效果.算法具体的工作流程如下:首先,根据测量得到的 $\{SNR_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$,为每个 AP a 随机选择一个用户 $c(SNR_{a,c} > SNR_{min})$,即用户必须满足关联条件)作为初始的聚类中心,关联在同一 AP 下的用户称为聚类;所剩下的其他用户,则根据它们与这些聚类中心的相似度(采用测度函数来判断,本文采用 SNR 的均方差作为标准测度函数)及关联条件,分别将它们分配给与其最相似的聚类;然后再计算每个所获得的新聚类的聚类中心(该聚类中所有用户的 SNR 均值,用 μ_a 表示);不断重复上述过程,直到聚类及聚类中心不再发生变化.详细的伪码描述见算法 1.

算法 1. User allocation sub-algorithm.

Input: $\{SNR_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$;

Output: $U = \{u(a)\}_{a \in A}$, $\mu = \{\mu_a\}_{a \in A}$.

1. Initialize $\mu_a = 0$, $u(a) = \{\}$, $u'(a) = \{\}$, for all $a \in A$; // $u'(a)$ is a temporary variable
2. $C_{init} = C$;
3. For each AP a in A ;
4. Randomly select user c in C , such that $SNR_{a,c} > SNR_{min}$; // construct initial cluster
5. Set $\mu_a = SNR_{a,c}$, $u'(a) = u'(a) + c$, and $C = C - c$;
6. End For;
7. Initialize $\beta_a = 0$, for all $a \in A$;

8. While ($\mu \neq \beta$) //if clusters do not change, then quit the loop
9. $\beta = \mu_a$, for all $a \in A$;
10. While ($C \neq \{\}$)
11. For user c in C , find AP a in A , such that $SNR_{a,c} > SNR_{\min}$ and minimizing $\|SNR_{a,c} - \mu_a\|$;
12. $u'(a) = u'(a) + c$, and $C = C - c$;
13. $\mu_a = (SNR_{a,c} + \mu_a) / |u'(a)|$; //recompute new cluster center
14. End While;
15. $C = C_{\text{init}}$;
16. $u(a) = u'(a)$, $u'(a) = \{\}$, for all $a \in A$;
17. End While;
18. Return $U = \{u(a)\}_{a \in A}$ and $\mu = \{\mu_a\}_{a \in A}$;

数据挖掘中的聚类划分法通常要求同一聚类中的数据越近越好,而不同聚类中的数据越远越好.但在本算法中,用户 SNR 是一个高度时变的参数,此外,SNR 与用户吞吐量并不符合完全的线性比例关系,因此,追求最优聚类对本文而言并无实际意义.算法 1 采用随机式启发规则,通过循环迭代操作不断改进同一 AP 下用户的聚类效果,直到聚类及聚类中心不再发生变化时,算法终止.

3.1.2 频谱分配子算法

算法 1 产生的用户分配解 $U = \{u(a)\}_{a \in A}$ 满足用户关联且只关联一个 AP 的条件,因此可以消除第 2.2 节所述问题模型中的约束条件(5)和约束条件(6),目标优化问题转变成一个纯频谱分配问题.为解决这一问题,本节设计了一种负载感知的频谱分配子算法.本算法根据队长矩阵 $\{q_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$ 计算各 AP 的负载状况,与我们前期工作^[12]不同,在进行频谱分配时综合考虑 AP 负载状况及其关联用户的 SNR 均值 μ_a .通常,若负载大且 μ_a 值高,则分配宽信道有助于优化吞吐量减小队长;若负载小且 μ_a 值低,则分配较窄信道,有助于提高用户 SNR 和性能;而对于负载大且 μ_a 值低的 AP,分配宽信道会进一步降低用户 SNR,对网络性能会产生负面影响;而对于负载小且 μ_a 值高的 AP,分配宽信道则会造成频谱浪费,降低频谱使用效率.根据上述分析,我们设定目标函数(公式(1))的 AP 负载函数 $l(a) = \theta \times \sum_{c \in u(a)} q_{a,c} + \mu_a$,其中, θ 为均衡因子,用以平衡负载和 SNR 对频谱分配的影响.

经过上述调整之后,目标优化问题仍是 NP 难问题,不能够直接求解.为此,我们将频谱分配子算法进一步分解成两部分:第 1 部分基于 $\{SNR_{a,b}\}_{a \in A, b \in A}$,采用传统的着色法对 AP 进行信道分配,消除 AP 之间的干扰;第 2 部分根据 AP 负载状况及 μ_a 调整各信道的频谱宽度,以优化频谱效率和系统吞吐量.经过第 1 步的信道分配,可以消除干扰约束条件(2),加之前面消除的约束条件(5)和约束条件(6),我们对目标优化问题进行重写,其形式化描述如下:

$$\text{MAXNUM}(w) = \left. \begin{aligned} & \text{FIND}\{w(a)\}_{a \in A} \\ & \sum_{a \in A} (\theta \times \sum_{c \in u(a)} q_{a,c} + \mu_a) \times \log(w(a)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in A} w(a) \leq bw \quad (8)$$

$$w(a) > 0, \text{ for } a \in A \quad (9)$$

从上述优化模型可以看出,约束条件(8)和约束条件(9)是线性约束,而目标函数是凸函数,因此,从优化的角度来看,上述优化问题是一个凸规划问题.为解决此问题,本算法采用 Frank-Wolfe 方法^[18]解决上述具有线性约束的凸规划问题.将算法的两部分结合起来,频谱分配子算法的详细伪码描述见算法 2.

算法 2. Spectrum allocation sub-algorithm.

Input: $U = \{u(a)\}_{a \in A}, \{q_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}, \mu = \{\mu_a\}_{a \in A}, SNR_AP = \{SNR_{a,b}\}_{a \in A, b \in A}, SNR = \{SNR_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$;

Output: $F = \{(f_{\text{top}}(a), f_{\text{bot}}(a), w(a))\}_{a \in A}$.

1. Construct AP interference map I based on $SNR_AP = \{SNR_{a,b}\}_{a \in A, b \in A}$;
2. Sort nodes by the descending order of degree of each node in I , represented by array $Nodes[]$;

3. $chn=1$; //color number;
4. For $i=1$ to $sizeof(Nodes[])$
5. Assign to $Nodes[i]$ the smallest available color j ($j \leq chn$) not used by the neighbor nodes of $Nodes[i]$;
6. If (need a fresh color)
7. $chn=chn+1$;
8. $i=i-1$; //recolor;
9. End If;
10. End For;
11. Divide the $W(f_{top}, f_{bot}, bw)$ into chn channels evenly, i.e., $w(1)=w(2)=\dots=w(chn)$;
12. $w_{cur}=(w(1), w(2), \dots, w(chn))$;
13. While (true)
14. Solve the linear programming $\nabla NUM(w_{cur})^T w$ s.t. $w(i) > 0$ for $i=1$ to chn ;
15. Get the optimal solution w_{opt} ;
16. If $|\nabla NUM(w_{cur})^T (w_{opt} - w_{cur})| \leq \varepsilon$
17. Break;
18. End If;
19. Solve the following problem, $\min NUM(w_{cur} + \theta \times (w_{opt} - w_{cur}))$ s.t. $0 \leq \theta \leq 1$;
20. Get the optimal step size θ ;
21. $w_{cur} = w_{cur} + \theta \times (w_{opt} - w_{cur})$;
22. End while;
23. Sort array w_{opt} by the ascending order; //thinner channel, lower frequency;
24. $f_{cur} = f_{bot}$;
25. For $i=1$ to chn
26. $f_{bot}(i) = f_{cur}$, $f_{top}(i) = f_{bot}(i) + w_{opt}(i)$;
27. assign $\langle f_{top}(i), f_{bot}(i), w_{opt}(i) \rangle$ to channel i ;
28. $f_{cur} = f_{top}(i)$;
29. End For;

算法的第 1 行~第 10 行采用基于节点度的贪心法进行信道着色,相邻干扰 AP 分配不同的非干扰信道.第 11 行表明,算法初始化阶段将可用频谱平均分配到各信道.第 12 行~第 22 行是对优化问题(公式(7))的求解,第 22 行~第 27 行根据优化结果,按照频谱宽度大小,从低频到高频依次将可用频谱分配到各信道.

3.2 算法实现讨论

本节主要针对算法的可实现性进行讨论,难点问题主要包括: $\{SNR_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$ 的获取和用户关联控制的实现.在 $\{SNR_{a,c}\}_{a \in A, c \in C}$ 的获取方面,可采用 IEEE 802.22 标准^[19]中的信道切换请求和同步机制:首先,控制器通过 AP 向所有用户发送信道切换请求,在收到所有用户的响应后,同步切换到同一公共开放信道上,并进行相应的时钟同步更新;其次,控制器依次随机地选择 AP 发送 beacon 报文,各用户记录其所监听到信标消息的 SNR;最后,各用户通过正常数据传输的确认 ACK 报文将 SNR 捎带回控制器.在用户关联控制方面,实现目标是控制器可以将用户关联到指定 AP.当需要进行用户关联控制时,控制器首先通过 AP 发送标准解关联操作报文;用户收到解关联报文后,与 AP 实现解关联,并触发主动信道扫描操作,控制器指定某一 AP 返回信道扫描响应报文,其余 AP 一律忽略此用户的信道扫描报文;最后,用户收到唯一的信道扫描响应报文后,主动关联至此 AP.

3.3 算法复杂性分析

算法 1 采用的是一种基于样本间相似性度量的间接聚类方法,把 $|C|$ 个用户分配到 $|A|$ 个 AP 下,使相同 AP 下

的用户具有较高的 SNR 相似度.算法 1 是一种较为典型的逐点修改迭代的动态聚类算法,其要点是以均方差为测度函数,逐点修改聚类中心,每次迭代所需计算复杂度为 $O(|C| \times |A|)$.此外,算法 1 采用随机式的启发规则,经过有限次迭代,测度函数将收敛.因此,算法 1 的计算复杂度为 $O(|C| \times |A| \times d)$,其中, d 为算法的迭代次数.

算法 2 主要包括基于节点度的贪心着色算法和频谱宽度分配两部分:

- 基于着色法的信道分配计算复杂度为 $O(|A|^2)$;
- 信道频谱宽度分配需要解决有约束的线性优化问题,目前,解决该问题最有效的算法(如 Karmarkar 算法^[18])的计算复杂度为 $O(n^{3.5} \times \tau)$,其中, n 为优化变量(本算法中为信道数目), τ 为算法的输入比特数.

因此,算法 2 的计算复杂度为 $O(ch n^{3.5} \times \tau \times d)$,其中, d 为算法的迭代次数.

4 性能仿真及结果分析

本节对算法性能进行仿真评价和分析.由于目前尚无类似算法进行直接对比分析,我们采用横向比较法,即与固定频谱宽度分配法、基于负载的自适应频谱宽度分配法进行比较.性能评价采用真实数据驱动的仿真评价方法,将真实无线网络环境采集到的流量、AP 负载和用户关联数据当作优化模型的输入,通过 MATLAB 的 CVX 插件^[20]实现优化算法,求解目标优化问题模型.

4.1 实验数据

实验采集的数据来自于清华大学 FIT 楼一层的无线网络,该无线网络采用集中式网络结构,部署了 9 个 AP,每个 AP 配有一个无线接口,网络采用 3 个非重叠信道进行覆盖,所有 AP 通过高速以太网连接到集中控制器,其详细的网络拓扑如图 3 所示.

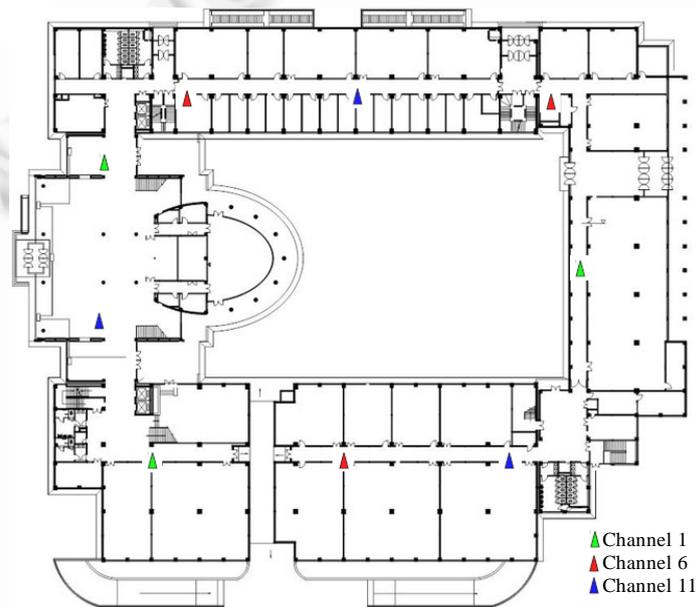


Fig.3 Network topology

图 3 网络拓扑

我们开发了一个相应的无线管理系统对 AP 流量、用户关联信息、用户 SNR 以及用户流量等信息进行监控和分析,选择 2009 年 7 月 15 日的数据进行仿真分析,网络系统的日流量变化曲线如图 4 所示.

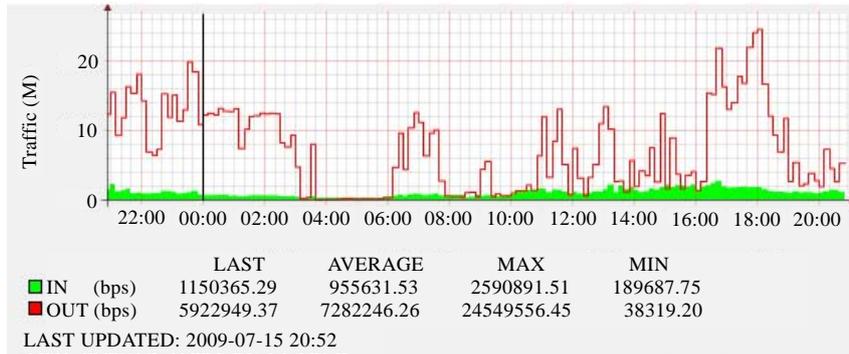


Fig.4 Statistical information of daily traffic

图4 日流量统计信息

4.2 仿真结果分析

上述网络实验数据中只用到了 3 个 20MHz 宽度的信道,据此,我们将整个可用空闲频谱带宽设置为 $bw=60\text{MHz}$.此外,设定算法 2 中的误差 $\varepsilon=0.1$ 和均衡因子 $\theta=10$.实验数据采集的时间精度为 5s,以小时为单位,采用统计平均的方式对结果进行比较分析.本节主要从网络吞吐量和缓冲区平均队长两个方面对算法进行评价,通过时间段、用户关联数及流量的变化来衡量不同方法对上述两个系统性能指标的影响.

4.2.1 网络吞吐量比较

图 5 显示出 3 种算法在不同时间段的系统吞吐量变化曲线.从图中可以看出,本文所提算法能够在不同的时间段、流量和网络环境下有效地提升系统吞吐量,尤其是在网络流量变化较大的时间段,如 1:00~3:00,11:00~13:00,16:00~19:00.

图 6 和图 7 进一步显示了在 10:00~11:00 和 18:00~19:00 两个时间段下,各 AP 的用户关联数及其吞吐量变化曲线.图 6(a)和图 7(a)表明,本算法能够通过用户关联控制使用户分布更为合理,有效地缓解了远近效应问题,同时使各 AP 之间的吞吐量更为均衡,进而提升了系统总的吞吐量,这一点在图 6(b)和图 7(b)中都得到了验证.与固定频谱宽度分配法相比,本算法的平均吞吐量优化率达到了 70%;与自适应频谱宽度分配法相比,平均吞吐量优化率为 20%,最高达到 36%.

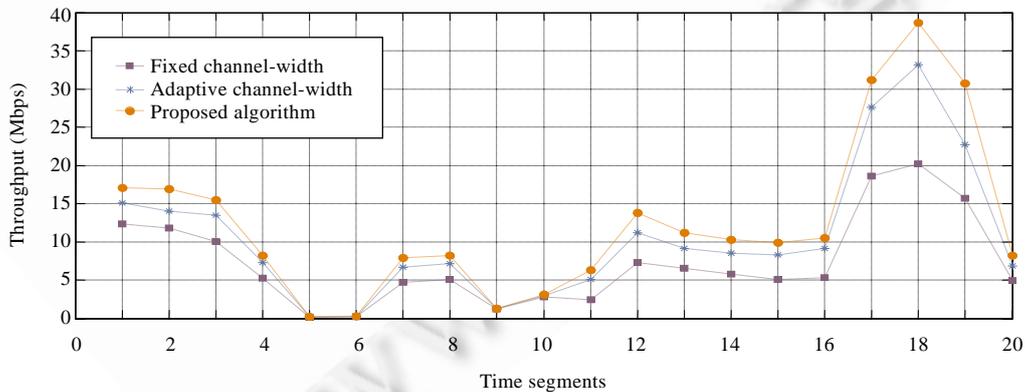


Fig.5 Throughput comparison at different time segments

图5 不同时间段的吞吐量比较

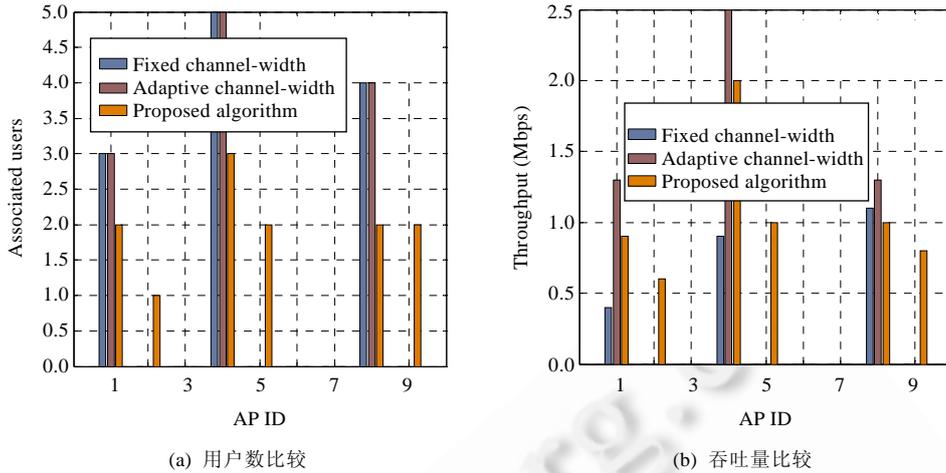


Fig.6 Comparison of user number and throughput of each AP at 10:00~11:00
图 6 10:00~11:00 各 AP 的用户数与吞吐量比较

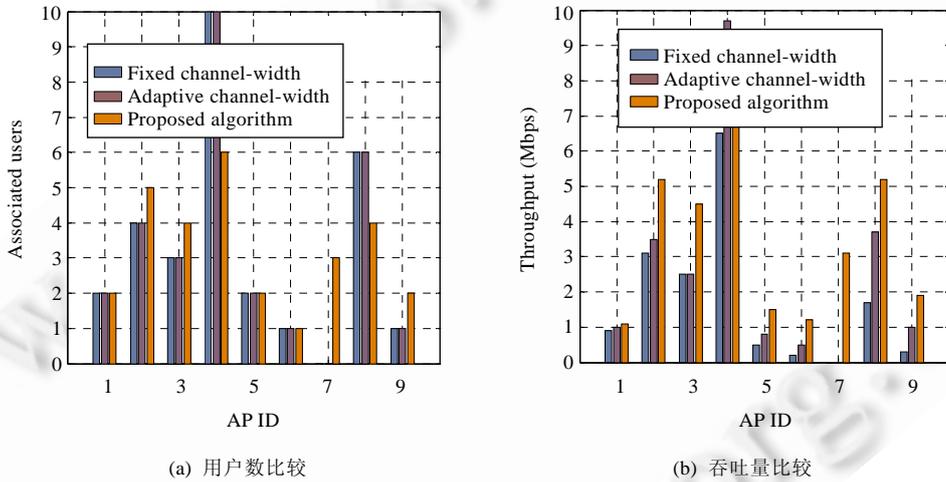


Fig.7 Comparison of user number and throughput of each AP at 18:00~19:00
图 7 18:00~19:00 各 AP 的用户数与吞吐量比较

4.2.2 报文缓冲区队长比较

3 种算法的 AP 报文缓冲区平均队长在不同时间段的变化曲线如图 8 所示.本文所提算法在缓冲区队长优化方面具有明显的效果:与固定频谱宽度分配法相比,本算法的平均缓冲区队长减少了 196%;与自适应频谱宽度分配法相比,平均减少了 105%.这主要得益于本算法的用户与频谱分配的整体优化,在通过关联控制减轻远近效应的基础上,利用基于负载和用户 SNR 均值的自适应频谱宽度分配算法提升重载 AP 的信道容量,将低频分配给窄信道,高频分配给宽信道,进而有效地消除了缓冲区报文堆积问题.

图 9(a)和图 9(b)分别显示了 10:00~11:00 和 18:00~19:00 两个时间段下各 AP 的平均队长,从图中可以看出,在多用户和大流量模式下,本算法仍然能够取得良好的优化效果,而自适应频谱宽度分配法则只能在小量用户模式下取得一定的优化效果.

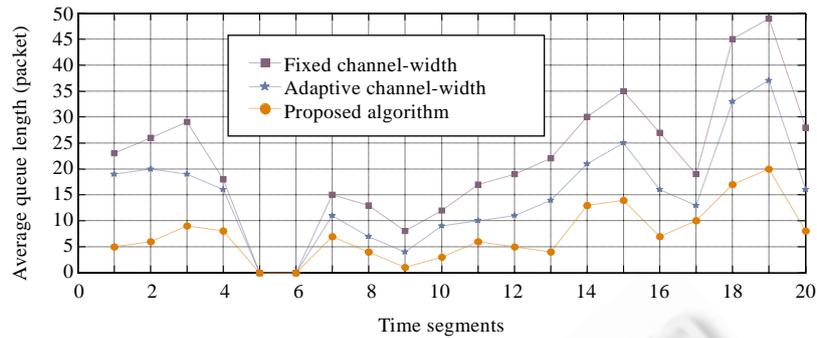
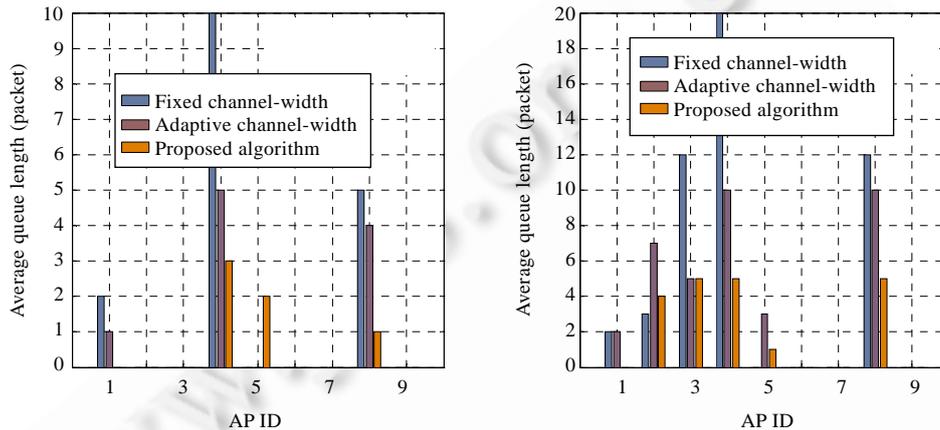


Fig.8 Comparison of average queue length at different time segments

图 8 不同时间段的平均队长比较



(a) 10:00~11:00 各 AP 平均队长比较

(b) 18:00~19:00 各 AP 平均队长比较

Fig.9 Comparison of average queue length of each AP at different time segments

图 9 不同时间段的各 AP 平均队长比较

5 结束语

本文针对无线网络中的用户和频谱分配问题进行了深入研究,提出了一种基于用户分配和负载的频谱分配算法.该算法基于聚类划分理论,解决了无线接入网络中普遍存在的远近效应问题,在此基础上,采用基于报文缓冲区队长和 SNR 平均值的频谱分配算法,解决了 AP 间负载不均衡问题,提升了网络系统性能.通过用户和频谱分配问题的整体求解,很好地解决了两者之间的影响问题,取得良好的整体优化效果.真实数据驱动的仿真实验结果表明,在不同的用户关联及流量的变化模式下,该算法都能够有效地提高系统吞吐量,同时大幅度减小 AP 报文缓冲区队长.由于本文的目标优化模型中并未考虑用户之间的干扰问题,在实际的网络环境下不一定能够取得预期的优化效果.因此,下一步研究工作应会考虑如何将用户之间的干扰问题加入到目标优化模型中.

References:

- [1] Tandra R, Sahai A. Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing. Maui: IEEE Press, 2005. 464-469. [doi: 10.1109/WIRLES.2005.1549453]
- [2] Zhao Q, Sadler BM. A survey of dynamic spectrum access: Signal processing, networking, and regulatory policy. IEEE Signal Processing Magazine, 2007,24(3):79-89. [doi: 10.1109/MSP.2007.361604]
- [3] Yuan Y, Bahl P, Chandra R, Moscibroda T, Wu Y. Allocating dynamic time-spectrum blocks in cognitive radio networks. In: Proc. of the 8th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2007). Berkeley: ACM Press, 2007. 130-139. [doi: 10.1145/1288107.1288125]

- [4] Yang L, Hou W, Zhao BY, Zheng H. Supporting demanding wireless applications with frequency-agile radios. In: Proc. of the 7th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2010). New York: ACM Press, 2010. 65–80.
- [5] Moscibroda T, Chandra R, Wu Y, Sengupta S, Bahl P, Yuan Y. Load-Aware spectrum distribution in wireless LANs. In: Proc. of the 16th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2008). Riverside: IEEE Press, 2008. 137–146. [doi: 10.1109/ICNP.2008.4697032]
- [6] Rayanchu S, Shrivastava V, Banerjee S. FLUID: Improving throughputs in enterprise wireless LANs through flexible channelization. In: Proc. of the 17th ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2011). New York: ACM Press, 2008. 1–12. [doi: 10.1145/2030613.2030615]
- [7] Bejerano Y, Han SJ, Li L. Fairness and load balancing in wireless LANs using association control. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2007,15(3):560–573. [doi: 10.1145/1295237.1295244]
- [8] Papanikos I, Logothetis M. A study on dynamic load balance for IEEE 802.11b wireless LAN. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Advances in Communication and Control (COMCON 2001). William R. Wells, 2001. 83–89. http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee228a/fa03/228A03/802.11%20wlan/dynamic_load_balancing.pdf
- [9] Balachandran A, Bahl P, Voelker GM. Hot-Spot congestion relief and service guarantees in public-area wireless networks. ACM Computer Communication Review, 2002,32(1):59–59. [doi: 10.1145/510726.510733]
- [10] Tsai TC, Lien CF. IEEE 802.11 hot spot load balance and QoS maintained seamless roaming. In: Proc. of the National Computer Symp. (NCS 2003). Inderscience, 2003. 1986–1992. <http://130.203.133.150/showciting.jsessionid=0892457328420FE9967E227BB5920191?cid=9108879>
- [11] Kumar A, Kumar V. Optimal association of stations and APs in an IEEE 802.11 WLAN. In: Proc. of the National Conf. on Communications (NCC 2005). New York: IEEE Press, 2005. 164–169. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.158.9503>
- [12] Chen J, Li H, Wu J. SES: Stable and efficient solution for rate control and spectrum allocation in wireless LANs. Wireless Personal Communications, 2012,66(1):81–99. [doi: 10.1007/s11277-011-0327-2]
- [13] Balachandran A, Voelker GM, Bahl P, Rangan PV. Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN. In: Proc. of the Int'l Conf. on Measurements and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2002. 195–205. [doi: 10.1145/511334.511359]
- [14] IEEE 802.11-2007: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Computer Society, 2007.
- [15] Nandagopal T, Kim TE, Gao X. Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks. In: Proc. of the 6th ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000). New York: ACM Press, 2000. 87–98. [doi: 10.1145/345910.345925]
- [16] Sharma G, Shroff NB, Mazumdar RR. Maximum weighted matching with interference constraints. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications. IEEE Press, 2006. 70–74. [doi: 10.1109/PERCOMW.2006.79]
- [17] Kanungo T, Mount DM, Netanyahu NS, Piatko CD, Silverman R, Wu AY. An efficient k -means clustering algorithm: Analysis and implementation. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002,24(7):881–892. [doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017616]
- [18] Bertsekas D. Nonlinear Programming. 2nd ed., Belmont: Athena Scientific, 1999. 191–272.
- [19] IEEE 802.22 working group on wireless regional area networks. IEEE Computer Society, 2011. <http://www.ieee802.org/22/>
- [20] Grant M, Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming. Version 1.21. 2011. <http://cvxr.com/cvx>



陈剑(1980—),男,江西萍乡人,博士,讲师,主要研究领域为无线网络,移动互联网。
E-mail: netsavage@163.com



李贺武(1974—),男,博士,副研究员,主要研究领域为下一代互联网无线网络,移动互联网。
E-mail: lihewu@cernet.edu.cn



吴建平(1953—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络,互联网。
E-mail: jianping@cernet.edu.cn