

## 开放式频谱系统中启发式动态频谱分配算法<sup>\*</sup>

郝丹丹<sup>+</sup>, 邹仕洪, 程时端

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

### Heuristic Algorithms for Dynamic Spectrum Assignment in Open Spectrum System

HAO Dan-Dan<sup>+</sup>, ZOU Shi-Hong, CHENG Shi-Duan

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-89644038, Fax: +86-10-62247638, E-mail: d.hao@126.com

Hao DD, Zou SH, Cheng SD. Heuristic algorithms for dynamic spectrum assignment in open spectrum system. *Journal of Software*, 2008,19(3):479–491. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/479.htm>

**Abstract:** Considering the factor of system sum bandwidth, two heuristic dynamic spectrum assignment algorithms for open spectrum systems are proposed according to convergency and fairness based on existing ones, they are the fast convergency algorithm with maximum bandwidth (FCMB) and the heuristic fairness algorithm with maximum bandwidth (HFWB). The performance of FCMB and HFWB is compared with the one of the collaboration max-sum-bandwidth (CMSB) algorithm, the randomized distributed (RAND) algorithm and the theoretical max-bandwidth optimal (OPTL) algorithm in system sum bandwidth, fairness and convergency by simulations. Furthermore, the effect of the numbers of primary users, secondary users and channels as well as the radius variance of disturbance area on the performance of those two algorithms is studied. Taking the system sum bandwidth into consideration, experimental results show that FCMB and HFWB outperform other three algorithms in convergency and fairness respectively, particularly FCMB shows superior performance in convergency (more than 300% improved than CMSB while FCMB performs similarly in system throughput).

**Key words:** open spectrum; dynamic assignment; heuristic algorithm; convergency; fairness

**摘要:** 在回顾了现有的开放式频谱系统中的动态频谱分配算法后,基于快速收敛和公平性两方面的性能因素并兼顾系统总带宽性能,提出了两种易于实现且具有良好收敛性能的启发式频谱动态分配算法——兼顾最大化系统总带宽的快速收敛算法(fast convergency algorithm with maximum bandwidth,简称 FCMB)和兼顾最大化系统总带宽的启发式公平性分配算法(heuristic fairness algorithm with maximum bandwidth,简称 HFWB)。通过大量的仿真实验,就系统总带宽、公平性以及收敛性能 3 个方面,与现有的协调式最大化系统总带宽(collaboration max-sum-bandwidth,简称 CMSB)算法、随机分布式算法(randomized distributed algorithm,简称 RAND)以及以最大化系统总带宽为目标的理论最优(theoretical max-bandwidth optimal,简称 OPTL)算法进行了比较,并针对主、次用户数目变化、系统中信道数目以及次用户干扰区域半径大小变化等不同系统参数情况下各种算法的性能进行了对比分析

\* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2003CB314806 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA12Z321 (国家高技术研究发展计划(863)) the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60603060, 60472067, 90604019 (国家自然科学基金)

Received 2006-12-08; Accepted 2007-03-07

析,仿真结果表明,在综合考虑系统总带宽的基础上,FCMB算法和HFWB算法在快速收敛和兼顾系统带宽的公平性能上分别表现突出,尤其是FCMB算法,其在收敛速度上远远优于其他算法(和与其在系统吞吐性能上表现相近的CMSB算法相比,在收敛性能上至少有300%的提高).

关键词: 开放式频谱;动态分配;启发式算法;收敛性;公平性

中图法分类号: TP301 文献标识码: A

无线通信研究的两个主要目标就是最大化无线频谱利用率和避免干扰<sup>[1]</sup>.为避免干扰,政府部门对无线电频谱资源进行统一的宏观管理,通过给不同系统、应用颁发无线频谱使用牌照来为其分配特定的频段.这样的固定无线电频谱分配虽然避免了不同应用间的干扰,却带来了极低的频谱利用率和频谱资源匮乏问题.近年来的调查发现,固定无线电频谱分配导致频谱利用率只有5%~10%<sup>[2]</sup>.这种统一调控的频谱固定划分机制是基于20世纪20年代的技术<sup>[3]</sup>,当时的无线电技术还不能很好地区分不同的传输.而随着无线技术的飞速发展,凸显了固定频谱分配的不合理,因此,近年来一些无线电领域的研究人员提出了开放式频谱管理的思想<sup>[3]</sup>.此外,软件无线电(software-defined radio,简称SDR)、感知无线电(cognitive radio,简称CR)以及扩频技术的不断成熟,也使得开放式频谱管理成为了可能.

开放式频谱管理思想允许用户感知本地可用频段(包括其不具有牌照的频段),并能够在频段空闲时按照一定的分配算法,在不干扰有牌照用户(primary users,简称PU,主用户)的前提下抓住机会使用这些频段.现有的开放式频谱分配研究主要是针对无牌照用户(secondary users,简称SU,次用户)间的动态频谱分配,如文献[2,4,5]等.根据分配架构的不同,可以分为集中式和分布式两大类,集中式算法计算复杂度高,频谱分配集中控制设备可能成为计算瓶颈.分布式算法多采用启发式分配方法,收敛性(算法的汇聚时间)是其一项重要的性能指标,体现了算法对系统变化的适应能力.Zheng等人基于最大化系统总带宽、最大最小带宽和最大化比例公平3个原则对开放式频谱分配算法进行了研究<sup>[1,4,5]</sup>,其算法考虑了不同用户获得频段后产生的回报不同,但对开放式频谱管理系统动态变化的适应力较差.Cao等人针对Ad-Hoc网络提出了FBFP(fairness bargaining with feed poverty)算法<sup>[6]</sup>,通过把用户按地域分组来减少开销和复杂度,但却给其成组以及组的维护带来了额外的开销.Wang和Liu就开放式频谱共享问题分别基于最大化利用率和公平性提出了几种分配算法<sup>[7-9]</sup>,但其算法不是基于整个系统的吞吐性能去考虑的.Xing等人使用连续时间Markov链为开放式频谱接入建模<sup>[10]</sup>,并提出了随机接入算法,以期在不同的无线系统之间做到分配的高效和公平.该算法虽然考虑到了系统的差异(对带宽的需求不同),但只是针对简单系统的情况,对复杂系统来说不易实现.

因此,本文针对开放式频谱系统中次用户抓住机会使用空闲信道问题,对开放式频谱管理系统进行了建模,并在兼顾系统总带宽性能的基础上分别考虑了公平性和收敛性,以高效、易实现为目标,提出了两种启发式动态频谱分配算法(FCMB算法(fast convergency algorithm with maximum bandwidth)和HFWB算法(heuristic fairness algorithm with maximum bandwidth)).随后,通过大量仿真实验对算法性能进行了评估,并与现有算法进行了对比分析,验证了算法在系统总带宽、公平性以及收敛性这3方面的性能优势.

本文第1节是系统描述.第2节为系统模型.第3节在回顾了现有的3种经典算法之后给出FCMB和HFWB算法的详细描述.性能指标定义和仿真结果对比分析在第4节给出.最后是结论.

## 1 系统描述

开放式频谱分配系统允许在某个频谱范围上没有牌照的设备在该频谱范围上的频段使用率低的时候,根据一定的规则抓住机会使用其上空闲频段(或称信道),因此,其目标就是在不干扰该频谱上有牌照用户使用频谱的前提下,提高无线频谱利用率.对于在某个频谱范围内没有牌照的设备或者用户(次用户)来说,这些次用户有可能在其他频谱范围内有牌照,也就是说,在其有牌照的频谱范围内是主用户.本文开放式频谱系统中信道分配问题仅考虑信道在次用户间的不同分配方案对系统性能的影响,以如何在系统中次用户间合理分配信道来提高频谱利用率为算法的一个设计目标.开放式频谱系统中的次用户可以是一段无线链路,也可以是网络中的

无线接入点.在本文研究的开放式频谱系统中,采用次用户为网络中无线接入点的情形,并采用文献[3]中相同的假设,假设次用户可以采用与正交频分复用接入(orthogonal frequency division multiplexing access,简称OFDMA)相类似的技术,同时使用多个信道为其覆盖范围内的用户提供连接服务.

首先给出一个开放式频谱管理系统的模型.在一个  $X \times Y$  的区域  $A$  中,随机分布着  $N$  个主用户和  $M$  个次用户(如图 1 所示( $PU$ :主用户; $SU$ :次用户)),次用户采用 SDR 和 CR 技术可以感知和使用可用频段;系统中可用频谱被划分为  $K$  个完全正交的频段(在本文随后的讨论中,使用信道来表示系统中可用频段),系统中次用户在满足信道分配规则的前提下,可以同时使用多个信道;各信道所能提供的带宽以及其上的信号传输范围可能存在不同,但假设这些信道对称,上、下行带宽及可用性相同.假设用户间的干扰仅由其相互距离决定,因而,本文使用地理位置来判断两个无线传输链路是否存在干扰或者冲突.假设各用户(包括主用户和次用户)使用全向天线,主用户对于每个信道都对应一个覆盖区域,这个区域是以用户为圆心、以  $\Theta_{rp}(i,k)$  为覆盖半径的一个圆形区域( $i$  为主用户编号, $k$  为信道编号).如果次用户在这个覆盖区域内使用与主用户相同的信道,则将对主用户产生干扰,导致传输失败.而对于次用户来讲,其在每个信道上也有一个干扰区域,这个干扰区域就是以该用户为圆心、以  $\Theta_{rs}(j,k)$  为半径的一个圆形区域( $j$  为次用户编号, $k$  为信道编号).只有主用户在某个信道上的覆盖范围和次用户在该信道上的干扰范围在地理上没有重叠的时候,也就是说,次用户只有在与主用户的距离超过  $\Theta_{rp}(i,k) + \Theta_{rs}(j,k)$  时,使用与主用户相同的信道才不会对主用户产生干扰;而且,两个次用户在某个信道上的干扰区域如果出现重叠,则它们也不能同时使用该信道,否则将产生干扰,导致传输失败.值得注意的是,为了简化问题,本文未考虑功率控制因素,因此假设所有的主用户和次用户都使用相同的功率,所有主用户在各个信道上的覆盖区域大小相同,具有相同的覆盖半径  $\Theta_{rp}$ ;同理,次用户在各信道上的干扰区域大小也相同,即干扰半径相同,设为  $\Theta_{rs}$ .结合了功率控制的频谱分配算法将在以后的工作中进一步研究.为了讨论方便,如果某个信道对两个次用户来说均可用,且这两个次用户在该信道上的干扰区域出现重叠,则定义这两个用户在该信道上为邻居.

为了更好地描述系统,图 2 给出这样的开放式频谱管理系统的示例( $PU_i$ :主用户  $i$ ; $SU_j$ :次用户  $j$ ).区域  $A$  中随机分布着 4 个主用户( $PU_1, PU_2, PU_3$  和  $PU_4$ )和 5 个次用户( $SU_1, SU_2, SU_3, SU_4$  和  $SU_5$ ),系统中有 3 个可用信道 I~信道 III.图 2 中圆括号里的罗马数字编号为系统中主用户使用的信道编号,而花括号中的编号为系统中次用户感知到的可用信道.如图 2 所示,次用户  $SU_2$  的干扰范围和主用户  $PU_1$  的覆盖范围出现重叠,而主用户  $PU_1$  使用了信道 III,因此对于次用户  $SU_2$  来说,只有信道 I 和信道 II 是可用的.而次用户  $SU_1$  因为其干扰范围与各主用户的覆盖范围均不重叠,故信道 I~信道 III 对其来说均可用.在如图 2 所示的系统中,次用户  $SU_2$  和次用户  $SU_4$  在信道 I 和信道 II 上为邻居,次用户  $SU_2$  和次用户  $SU_3$  在信道 I 上为邻居.本文的研究就是寻求如何在干扰主用户的前提下,以系统总带宽或公平性为目标的信道 I~信道 III 在次用户间的分配算法.因为 Peng 已经在文献[4]中证明了这样的分配问题是多项式复杂程度的非确定性问题(non-deterministic polynomial,简称 NP 问题),故算法采用启发式的分配思路,在保证一定公平性的前提下尽可能地提高系统总带宽,以算法的快速收敛和易于实现为设计目标.

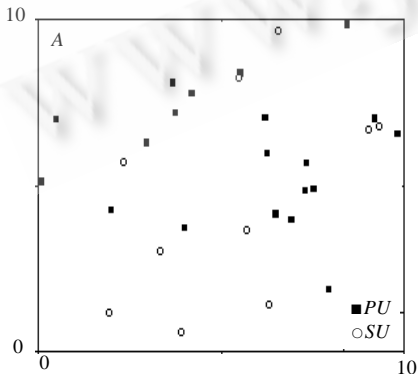


Fig.1 Illumination of the open spectrum system

图 1 开放式频谱系统示意图

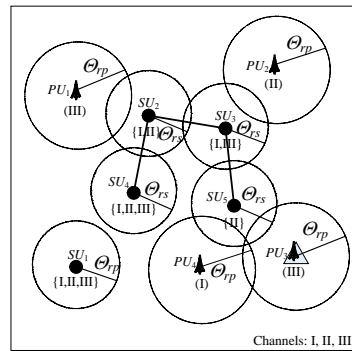


Fig.2 An example of the open spectrum system

图 2 开放式频谱系统示例

## 2 建模

由于图的着色算法已被广泛地应用于信道的动态分配问题上,如文献[11,12],因此,本文采用无向图为系统建模.设开放式频谱管理系统建模为一个无向图  $G=(V,E,C)$ ,其中, $V=\{v_i|i=1,\dots,M\}$ 是顶点集合,一个顶点代表一个次用户; $E=\{e_{ij}|i,j=1,\dots,M\}$ 是边的集合.因已假设了各次用户在各个信道上的干扰范围半径相同,所以,若用户  $i,j$  的干扰范围不出现重叠,则  $e_{ij}=0$ ,否则  $e_{ij}=1$ ,即  $e_{ij}=1 \cdot \{d_{ij} > 2\Theta_{rs}, i,j=1,\dots,M\}$ ,其中, $d_{ij}$ 为次用户  $i$  与次用户  $j$  之间的距离. $M \times K$  阶矩阵  $C=\{c_{i,k}|i=1,\dots,M,k=1,\dots,K\}$ 用来表示次用户的信道可用性,如果对于次用户  $i$  来说,信道  $k$  是可用的,即使用信道  $k$  的所有主用户的覆盖范围都与次用户  $i$  在该信道上的干扰范围没有重叠,则  $c_{ik}=1$ ,否则  $c_{ik}=0$ .以图 2 所示系统为例,该系统的模型为

$$V = \{SU_1, SU_2, SU_3, SU_4, SU_5\}, E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

此外,正如文献[1]中的分析,因为不同次用户在一个信道上的邻居数目是不同的,因此,不同次用户获得相同信道对系统总带宽性能方面所能带来的影响也是不同的.而在信道分配的时候,考虑这种回报的异质性因素,则可以获得更大的系统总带宽.因此,为了使开放式频谱管理系统获得更好的吞吐性能,在本文的分配算法中也考虑了回报的异质性因素,并使用一个  $M \times K$  阶矩阵  $R=\{r_{i,k}|i=1,\dots,M,k=1,\dots,K\}$ 来描述各次用户在不同信道上的回报.回报矩阵  $R$  中各元素的取值采用文献[1]中方法进行计算,计算公式如下:

$$r_{i,k} = b_{i,k} / \varphi_{i,k}, i=1,\dots,M, k=1,\dots,K \quad (1)$$

其中, $b_{i,k}$ 为次用户  $i$  在信道  $k$  上能够产生的最大带宽,系统中各用户在各个信道上能获得的最大带宽使用一个  $M \times K$  阶矩阵  $B=\{b_{i,k}|i=1,\dots,M,k=1,\dots,K\}$ 来表示带宽矩阵; $\varphi_{i,k}$ 为次用户  $i$  在信道  $k$  上的邻居数,而  $M \times K$  阶矩阵  $\Phi = \{\varphi_{i,k}|i=1,\dots,M,k=1,\dots,K\}$ 描述了系统中各个次用户在每个信道上的邻居数目.

此外,为了便于分析和讨论,还定义了距离矩阵、分配方案矩阵和干扰约束矩阵这 3 个矩阵模型.矩阵  $D$  为距离矩阵,用于描述系统中次用户间的距离,是一个  $M \times M$  阶矩阵,其定义如下:

$$D = \{d_{ij} | d_{ij} = \|i(x_i, y_i) - j(x_j, y_j)\|, i, j = 1, \dots, M\} \quad (2)$$

其中, $d_{ij}$ 为次用户  $i$  与次用户  $j$  之间的距离. $M \times K$  阶矩阵  $S=\{s_{i,k}|i=1,\dots,M,k=1,\dots,K\}$ 是一个有效的频谱分配方案,如果信道  $k$  分配给了次用户  $i$ ,则  $s_{ik}=1$ ,否则  $s_{ik}=0$ ;并设系统中有效频谱分配方案的集合为

$$Q_{M,K} = \{S | S = 1 \{s_{i,k} \cdot s_{j,k} \cdot e_{ij} \neq 0\} \cdot 1 \{s_{i,k} \leq c_{i,k}\}, i, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K\},$$

其中, $1\{\cdot\}$ 为示性函数. $M \times M \times K$  阶矩阵  $A=\{\lambda_{i,j,k}|i,j=1,\dots,M,k=1,\dots,K\}$ 是干扰约束矩阵.如果次用户  $i$  和次用户  $j$  在信道  $k$  上是邻居,则  $\lambda_{i,j,k}=1$ ,否则  $\lambda_{i,j,k}=0$ ,即

$$\lambda_{i,j,k} = 1 \{c_{i,k} \cdot c_{j,k} \cdot 1 \{d_{ij} \leq 2\Theta_s\}\}, i, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K \quad (3)$$

## 3 算法分析

虽然 Zheng 的协调的最大化系统总带宽算法(collaboration max-sum-bandwidth,简称 CMSB)<sup>[1]</sup>信息传递量少,但是算法实现时迭代次数多,当系统规模较大时,算法的迭代次数较大,算法实现的复杂度较高;而以通信开销和易实现为目标的 Wang 的分布式随机化算法(randomized distributed algorithm,简称 RAND)<sup>[9]</sup>虽然比其提出的分布式公平算法表现出了较好的系统总带宽,提供了较好的公平性,但是在系统总带宽性能上与他人的算法相差较大.因此,在本节中给出了两种快速收敛的启发式频谱分配算法,在兼顾系统总带宽性能的同时分别侧重于快速收敛性能和公平性能的提高.

### 3.1 现有算法回顾

为了更好地对所提出算法的性能与现有算法进行对比分析,在给出新算法之前先回顾现有的 3 种经典算法.就系统总带宽性能而言,采用以最大化系统总带宽为目标的理论上最优算法作为最优实现基准,并根据文

献[1]中的分析和仿真结果,因为 Zheng 在文献[1]中提出的协调式最大化系统总带宽算法在系统总带宽性能上的良好表现,故以其作为实际可实现算法在系统总带宽性能上的一种对比算法。而就公平性而言,则采用在此性能上表现突出的文献[9]中的随机化分布式算法作为对比算法。

#### (a) 以最大化系统总带宽为目标的最优化算法

虽然在实际系统中,在系统规模较大的情况下寻求最优化的分配方案是一个 NP 问题,但是,由于最优的分配方案能够作为问题分析中性能所能达到的上限,因此常常被用作对比分析。因为开放式频谱管理系统中的动态频谱分配思想就是为了提高无线频谱利用率,因此,本文采用以最大化系统总带宽为目标的理论上的最优化算法(theoretical max-bandwidth optimal,简称 OPTL)来作为此类算法在系统总带宽指标上的性能上限基准。该理论上的最优算法可以通过图的着色算法来实现:对可用信道逐一地把可用该信道的次用户按照其邻居数从小到大排列,先给邻居数小的次用户分配该信道,然后删去在该信道上与其产生干扰的其他次用户,依此类推,直至所有信道均已被分配。该最优化算法的效用函数见式(4):

$$\max_{S \in Q_{M,K}} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot b_{i,k} \quad (4)$$

#### (b) 协调式最大化系统总带宽算法

考虑到最优算法在实际应用中的不可行性,Zheng 在文献[1]中提出了一种以最大化总带宽为目标的启发式信道分配算法——协调式最大化系统总带宽算法。该算法根据次用户获得信道所能产生的回报来给次用户进行标记,每次只为各次用户标记能带给其带来回报最大的信道的回报值,并向其邻居发送该回报信息以及相关信道编号。系统中各次用户获得信息后,根据事先设计的规则,具有最大本地回报值的次用户根据规则(式(5)和式(6)<sup>[1]</sup>)选择使用相关信道,然后广播此次分配的相关信息,系统中其他次用户根据接收到的信息更新本地相关频谱信息后,进入下一次分配迭代过程。出于公平性考虑,如出现多个次用户具有相同的标记值时,优先给获得信道少的次用户分配信道,直至所有的信道都已分配。

$$label_i = \max_{k \in K} \sum_{k=1}^K r_{i,k}, \quad i = 1, \dots, M \quad (5)$$

$$color_i = \arg \max_{k \in K} \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot r_{i,k}, \quad i = 1, \dots, M \quad (6)$$

#### (c) 随机化分布式算法

Wang 也在文献[9]中对开放式频谱系统中次用户间的频谱分配算法进行了讨论,并提出了分布式贪婪算法、分布式公平算法和随机化的分布式算法 3 种动态分配算法。综合系统总带宽和公平性两个性能考虑,相比其他两种算法,随机化的分布式算法在性能上有较好的表现,因此,本文使用随机化的分布式算法来进行对比分析。该算法规则是各次用户对其各可用的信道随机产生一个 $[0, window]$ 之间的随机数,各次用户逐一考察所有信道相关联的随机数,如果该次用户在某个信道所对应的随机数在其邻居中是最大的,则该用户获得此信道,并与其邻居交换分配信息;次用户每获得一个信道,阈值  $window$  除 2,如未分配到一个信道,则阈值  $window$  乘 2;不断迭代直至所有的信道都被分配。

### 3.2 兼顾系统总带宽的快速汇聚算法

针对无线网络时变特性,在开放式频谱管理系统中,网络拓扑和信道的可用性均随着时间不停地变化着。为了更好地适应系统的这种动态特性,提出的第 1 个频谱分配方案就是以尽可能最大化系统总带宽和快速收敛性为目标,通过在分配时考虑信道回报异质性因素来尽可能地最大化系统总带宽;通过在信道分配的一次迭代过程中尽可能多地将可用信道分配给次用户,使得尽可能使用较少的迭代次数来完成一次完整的信道分配过程。FCMB 算法的具体描述为:各个次用户根据其所获知的邻居关系,为其感知的各可用信道计算出一个本地回报值,并对其可用信道中的每个信道逐一根据式(7)所描述的分配规则在本地进行信道分配,次用户对各个可用信道逐个与其邻居的信道信息进行比较,如果该次用户在某个信道上获得的回报是其邻居中最大的,则该次用户获得此信道;当与其邻居出现相同回报值时,已获得带宽较少的次用户获得信道;各次用户完成了本次分配

后,将其分配信息以及更新后的可用信道信息向其邻居进行广播,并准备进入下一个迭代周期,直至所有的信道都已分配.

$$s_{i,k} = 1 \left\{ i = \arg \max_{\substack{j=1,\dots,M \\ c_{i,k}=1 \\ n_{i,j,k}=1}} r_{i,k} \right\} = 1 \left\{ i = \arg \max_{\substack{j=1,\dots,M \\ c_{i,k}=1 \\ n_{i,j,k}=1}} b_{i,k} / \varphi_{i,k} \right\}, \quad i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K \quad (7)$$

在每个分配周期中,次用户根据式(7)描述的规则可能同时获得多个信道.图3为该算法实现的伪代码.

```

S=0
while there's channel available to secondary users do
  // one iteration procedure
  for i=1 to M do
    for k=1 to K do
      if ci,k=1
        Rwd(i,k) = max1 ≤ j ≤ M, j ≠ i, ni,j,k=1(ri,k)
        if ri,k > Rwd(i,k) or (ri,k == Rwd(i,k) and ui got less bandwidth) then
          si,k = 1
        end if
      end if
    end for
  end for
  Broadcasting channel assignments and available info to neighbors.
  All secondary users update matrix C, A, Φ, R.
end while

```

Fig.3 Pseudo code of FCMB algorithm

图3 FCMB 算法伪代码

### 3.3 兼顾系统总带宽的公平性算法

根据第3.2节中的描述可知,FCMB算法中的各用户根据算法规则在一次迭代的过程中尽可能多地分配信道,这使得算法完成全部信道分配的迭代次数较少,实现了快速收敛,这一点在下节中的仿真实验结果数据上也得到了证明(如图8、图11、图14和图17所示).但是,FCMB算法并没有太多地考虑公平性的因素.受到3G网络中分组调度算法M-LWDF算法的启发,考虑到信道分配的公平性因素,本文又提出了兼顾系统总带宽的公平性快速收敛算法(HFWB).在HFWB算法中,各次用户获得某个信道的回报值在式(1)的基础上乘以一个公平性权值 $\alpha_{i,k}(i=1,\dots,M,k=1,\dots,K)$ ,该权值的计算公式定义如下:

$$\alpha_{i,k}(t) = \frac{\sum_{j=1}^M \mathbb{1}\{d_{i,j} \leq 2 \cdot \Theta_{rs}\}}{\sum_{k=1}^K c_{i,k}(t-1)}, \quad t \geq 1, \quad i = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

其中, $\alpha_{i,k}(t)$ 为次用户*i*在信道*k*上于调度时刻*t*时的公平性加权值, $c_{i,k}(t-1)$ 为次用户*i*在进入调度时刻*t*前获得的总带宽.这就意味着,在每次迭代过程中进行信道分配的时候都考虑了该次用户的历史分配信息.

HFWB算法的具体步骤可以描述如下:

第1步.系统中各次用户根据广播信息及其感知到的可用信道信息初始化距离矩阵*D*、邻居矩阵 $\Phi$ 、干扰约束矩阵*A*、带宽矩阵*B*、可用信道矩阵*C*以及回报矩阵*R*.在初始化回报矩阵*R*时,为了防止出现分母为0的情况,此时设

$$\alpha_{i,k}(1) = \frac{\sum_{j=1}^M \mathbb{1}\{d_{i,j} \leq 2 \cdot \Theta_{rs}\}}{\sum_{k=1}^K c_{i,k}(1)}, \quad i = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K \quad (9)$$

第2步.系统中各次用户根据式(10)给出的分配规则在本地对其可用信道逐一进行信道分配:

$$s_{i,k} = 1 \left\{ i = \arg \max_{\substack{j=1,\dots,M \\ c_{i,k}(t)=1 \\ n_{i,j,k}=1}} r_{i,k}(t) \cdot \alpha_{i,k}(t) \right\} = 1 \left\{ i = \arg \max_{\substack{j=1,\dots,M \\ c_{i,k}(t)=1 \\ n_{i,j,k}=1}} \frac{b_{i,k}(t)}{\varphi_{i,k}(t)} \cdot \frac{\sum_{j=1}^M 1\{d_{i,j} \leq 2 \cdot \Theta_{rs}\}}{\sum_{k=1}^K c_{i,k}(t-1)} \right\}, \quad i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K \quad (10)$$

如果该次用户在某个信道上获得的回报  $r_{i,k}(t) \cdot \alpha_{i,k}(t)$  是其邻居中最大的,则该次用户获得此信道;当与其邻居出现相同回报值时,已获得带宽较少的次用户获得信道。

第 3 步.各次用户完成本次分配后,更新其可用信道矩阵  $C$ ,并将其信道分配信息以及更新后的可用信道信息向其邻居进行广播。

第 4 步.各次用户根据邻居广播的信道分配信息及信道可用性信息更新其干扰信息矩阵  $A$ 、邻居关系矩阵  $\Phi$ 、回报矩阵  $R$  以及公平性权值  $\alpha_{i,k}(t)$ 。

第 5 步.如果仍有可用信道待分配,则转第 2 步,进入下一个分配迭代过程;否则,信道分配结束。

图 4 给出了 HFWB 算法实现的伪代码。

```

S=0
Initiating  $\alpha_{i,k}(t)$  according to Eq.(12)
while there's channel available to secondary users do
  //one iteration procedure
  for  $i=1$  to  $M$  do
    for  $k=1$  to  $K$  do
      if  $c_{i,k}(t)=1$ 
         $RwdWgh(i,k) = \max_{1 \leq j \leq M, j \neq i, \hat{\alpha}_{i,j,k}=1} (r_{i,k}(t) \cdot \alpha_{i,k}(t))$ 
        if  $r_{i,k}(t) > Rwd(i,k)$  or  $(r_{i,k}(t) == Rwd(i,k)$  and  $u_i$  got less bandwidth) then
           $s_{i,k}=1$ 
        end if
      end if
    end for
  end for
  Broadcasting channel assignments and available info to neighbors.
  All secondary users update matrix  $C, A, \Phi, R$ .
  All secondary users update  $\alpha_{i,k}(t+1)$  according to Eq.(9).
end while

```

Fig.4 Pseudo code of HFWB algorithm

图 4 HFWB 算法伪代码

## 4 仿真及结果分析

### 4.1 性能指标

系统总带宽和公平性经常被用来评估一个信道分配算法的性能,前者用来评估算法所能带来的吞吐性能.此外,针对开放式频谱管理系统这样大规模的时变系统,算法的收敛特性也是影响算法性能的一个重要因素.只有快速收敛的算法才能快速适应网络拓扑、信道可用性的动态变化,尽可能实现较好的性能。

#### (a) 系统总带宽

设  $\Gamma_{Utilization}(S)$  为系统总带宽,用于衡量系统吞吐能力,定义其为系统中所有次用户获得的带宽总和,可根据下式进行计算:

$$\Gamma_{Utilization}(S) = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot b_{i,k}, \quad S \in Q_{M,K} \quad (11)$$

其中,  $S$  为一次有效的信道分配方案。

#### (b) 公平性指数

为了对开放式频谱管理系统中信道分配算法在所获带宽方面的公平性性能进行比较分析,采用公平性指数<sup>[13]</sup>来评估算法在各次用户获得带宽方面的公平性能.设  $S$  为一次有效的信道分配方案,则该分配方案下系统

中次用户所获得带宽的公平性指数  $\Gamma_{Fairness}(S)$  定义为

$$\Gamma_{Fairness}(S) = \left( \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot b_{i,k} \right)^2 / \left( M \cdot \sum_{i=1}^M \left( \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot b_{i,k} \right)^2 \right), S \in Q_{M,K} \quad (12)$$

由式(12)可知,公平性指数  $\Gamma_{Fairness}(S) \in (0,1)$ ,  $\Gamma_{Fairness}(S)$  的值越接近于 1, 各次用户所获得的带宽彼此越接近, 算法公平性越好. 为了防止系统中无空闲信道可供所有次用户分配的情况(即  $\sum_{i=1}^M \left( \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot b_{i,k} \right)^2 = 0$  时), 防止出现分母为 0 的情况, 定义

$$\Gamma_{Fairness}(S) = \left\{ 1 \left| \sum_{i=1}^M \left( \sum_{k=1}^K s_{i,k} \cdot b_{i,k} \right)^2 = 0 \right. \right\}, S \in Q_{M,K} \quad (13)$$

### (c) 算法收敛性

在开放式频谱管理系统中, 由于集中式的频谱分配算法因其计算复杂度高、算法开销大等因素, 通常采用分布式的分配算法, 而分布式算法中经常使用启发式的分配算法. 针对启发式的频谱分配算法来说, 算法的收敛性是评价算法性能的一个重要指标. 而且在实际的无线网络中, 因其移动特性、网络拓扑以及信道的可用性都随时间的变化而不断变化着, 对于这样的系统, 无疑需要用算法的快速收敛性来评估算法性能. 如果启发式的频谱分配算法的收敛速度慢, 也就是其完成一次完整且有效的信道分配所需的迭代次数过高, 就意味着该算法对系统动态变化的适应能力较差; 反之, 对于动态变化的系统来说, 一个相对好的算法, 应该在实际应用中只需要较少的迭代次数, 且随着系统规模的增大, 算法的迭代次数应缓慢增长. 因此, 使用算法在一次有效的完整信道分配过程中所需的迭代次数来评估算法的收敛性, 迭代次数越大, 算法的收敛速度越慢; 反之, 迭代次数越少, 算法的收敛速度越快.

## 4.2 仿真主要参数

在仿真实验中, 为了简化问题, 假设系统是一个准静态的或者是信道状态变化缓慢的无噪声无线系统, 且不考虑功率控制因素, 也就是说, 在系统一次完整的频谱分配过程中, 对于每个次用户来讲, 信道可用性信息以及干扰关系保持不变. 在该仿真系统中, 一定数目的主用户和次用户随机分布在一个  $10 \times 10$  的区域中, 每个主用户从能为其带来最大系统带宽的可用信道中随机选择一个信道使用; 因未考虑功率控制因素, 故假设所有的主用户和次用户分别具有相同的干扰区域半径, 且主用户和次用户的干扰范围分别为一个常数值,  $\theta_{ps}=2, \theta_{rs}=1$ . 基于以上假设, 分别考虑了系统中主用户数目变化、次用户数目变化、可用信道数目变化以及干扰范围变化 4 个因素, 对 FCMB 和 HFWB 算法就系统频谱利用率、公平性以及收敛性 3 方面性能带来的影响, 并与 CMSB 算法、RAND 算法和 OPTL 算法的仿真实验结果进行了对比分析. 下面所给出的所有仿真情形都是基于 2 000 种随机拓扑的开放式频谱系统中 5 种算法的仿真结果数据进行的统计, 并分别考虑了信道的带宽相同与不同两种情况, 图 6~图 17 中所有图(a)均为系统中信道吞吐能力相同的情况, 假设其能实现的带宽为 1; 相应地, 图 6~图 17 中所有图(b)均为系统中信道吞吐能力不同的情况, 此时假设系统中信道能实现的带宽分别为 0.81, 1, 1.23 这 3 种情况, 且这 3 个带宽信道数目在系统中的分配比率为 3:4:3.

## 4.3 主用户数目对算法性能的影响

从图 5~图 7 可以看出, 随着主用户数目的增加, 意味着次用户可用信道数目可能减少, 5 种算法的公平性基本保持不变(如图 6 所示); 系统总带宽均随系统中主用户数目的增加而减少(如图 5 所示); 收敛性方面, CMSB 算法随着系统中主用户数目的增加, 算法的迭代次数逐渐增加, 而 FCMB 算法、HFWB 算法和 RAND 算法的迭代次数基本恒定地保持在较低的水平上(如图 7 所示). 无论信道是否具有相同的吞吐能力, FCMB 算法虽然在系统总带宽性能上略低于 CMSB 和 OPTL 算法(小于 1%, 如图 5 所示), 但是其在收敛性能上要远远高于其他算法, 比 CMSB 在收敛性上提高 100% 以上、比 HFWB 和 RAND 算法也提高了 30% 以上(如图 7 所示), 而且, FCMB 算法的吞吐量要远远高于 HFWB 和 RAND 算法(如图 5 所示). 而 HFWB 算法在公平性性能方面远远优于 CMSB



算法、OPTL 算法和 FCMB 算法,虽然差于 RAND 算法,但是 HFWB 算法在系统总带宽性能上却高于 RAND 算法(如图 6 所示);而就收敛性而言, HFWB 算法远远优于 CMSB 算法 300% 以上,与 RAND 算法有基本相同(或表现出非常微弱的优势),仅略差于 FCMB 算法(如图 7 所示)。

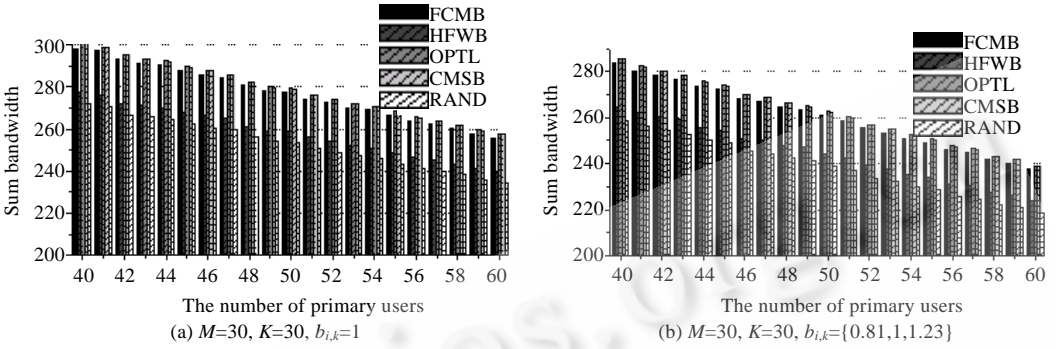


Fig.5 The number of primary users vs. system sum bandwidth

图 5 主用户数目与系统总带宽

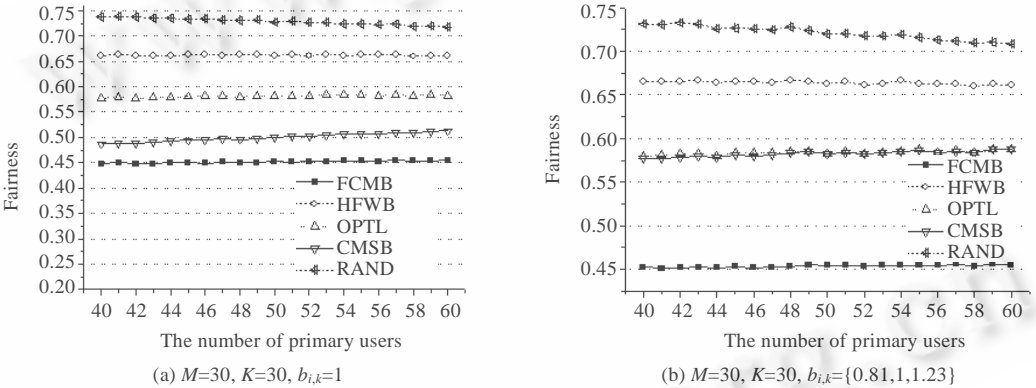


Fig.6 The number of primary users vs. fairness

图 6 主用户数目与公平性

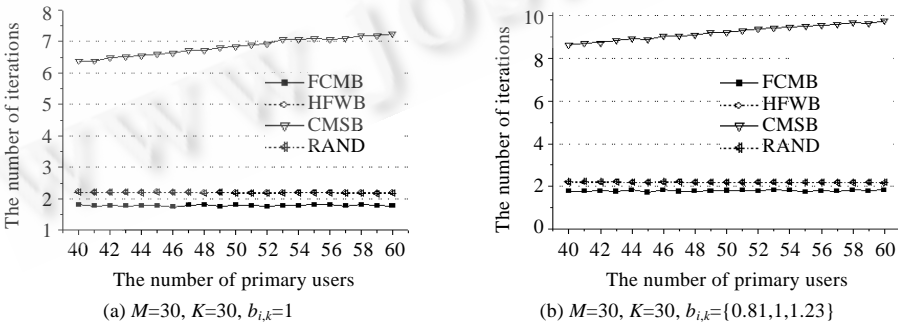


Fig.7 The number of primary users vs. the number of iterations

图 7 主用户数目与算法迭代次数

4.4 次用户数目对算法性能的影响

图 8~图 10 为系统中次用户数目的变化给算法性能带来的影响,5 种算法的系统总带宽均随系统中次用户

数目的增加而增加(如图 8 所示);公平性方面则随着系统中次用户数目的增加而下降(如图 9 所示),但 5 种算法的下降趋势相似;收敛性方面,CMSB 算法随着系统中次用户数目的增加,算法的迭代次数增加幅度较大,HFWB 算法和 RAND 算法的迭代次数基本恒定地保持在较低的水平上,而 FCMB 算法虽然迭代次数随次用户数目的增加而增加,但是增长幅度缓慢(如图 10 所示).由图 8~图 10 可以看出,随着次用户数目的增加,信道在次用户中重用的概率可能增加,无论是系统中各信道吞吐能力相同的情况还是不同的情况,FCMB 算法与 HFWB 算法在系统总带宽、公平性和收敛性方面的表现都与第 4.3 节中结果基本相同.

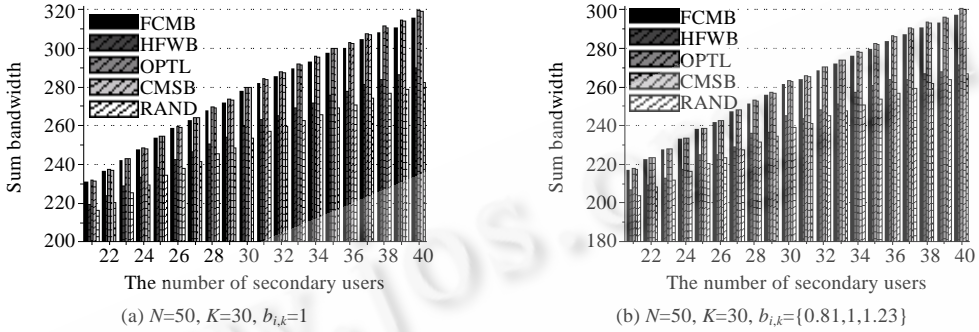


Fig.8 The number of secondary users vs. system sum bandwidth

图 8 次用户数目与系统总带宽

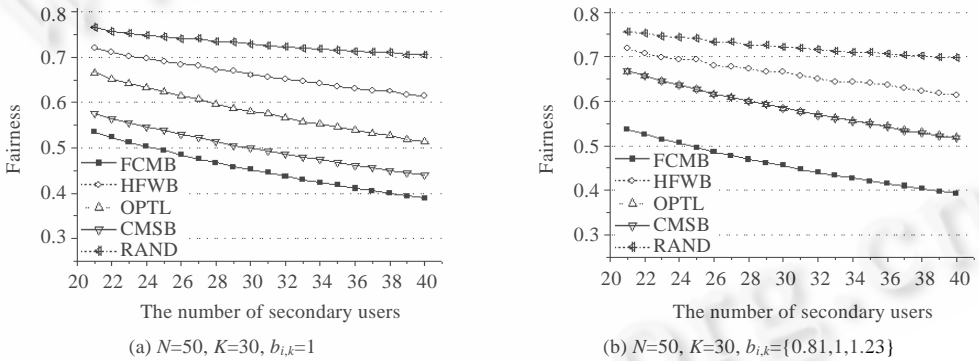


Fig.9 The number of secondary users vs. fairness

图 9 次用户数目与公平性

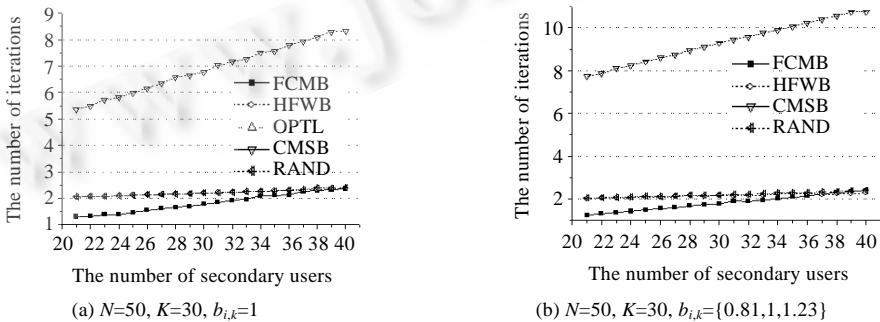


Fig.10 The number of secondary users vs. the number of iterations

图 10 次用户数目与算法迭代次数

### 4.5 信道数目对算法性能的影响

图 11~图 13 给出了 5 种算法在系统中信道数目发生变化时性能方面的表现.5 种算法在系统总带宽方面随

系统中信道数目的增加而增加(如图 11 所示),而在公平性和收敛性能方面基本不受信道数目变化的影响(如图 12 和图 13 所示).随着信道数目的增加,FCMB 算法在系统总带宽性能上与 OPTL 算法基本接近(如图 11 所示),但是,FCMB 算法在收敛性上却远远超过系统总带宽性能同样表现良好的 CMSB 算法(提高了 300%以上,如图 13 所示);而 HFWB 算法在公平性上也仍远远优于 CMSB 算法、OPTL 算法和 FCMB 算法,虽然,HFWB 算法在公平性上劣于 RAND 算法,且在收敛性上与 RAND 算法相比也未表现出明显的优势,但其在系统总带宽性能方面却明显高于 RAND.

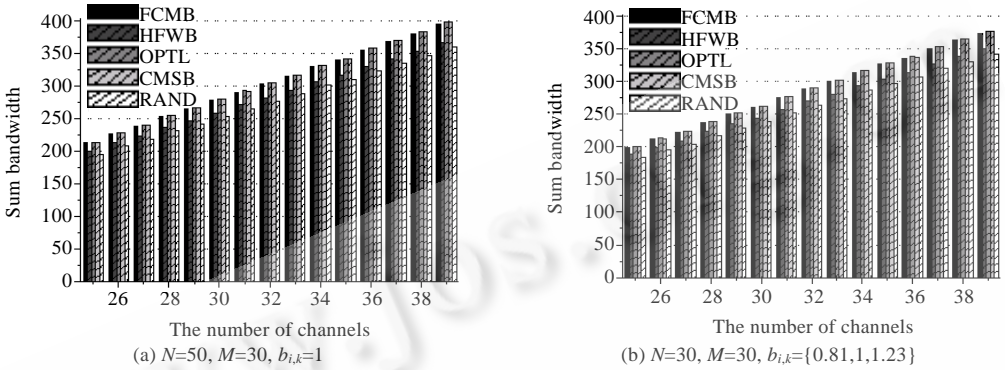


Fig.11 The number of channels vs. system sum bandwidth

图 11 信道数目与系统总带宽

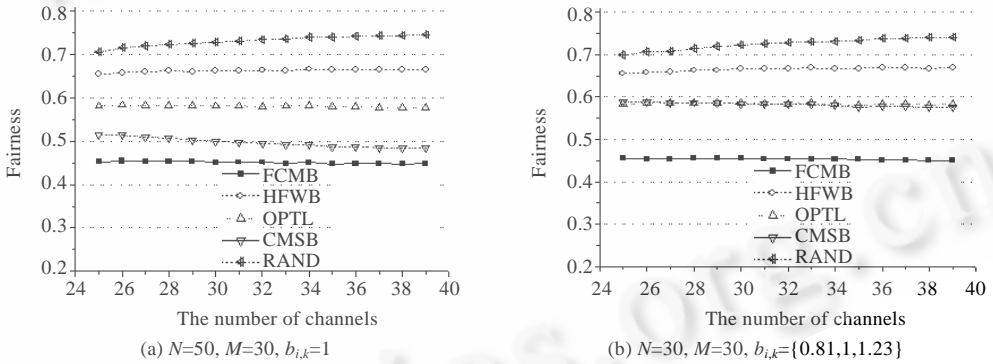


Fig.12 The number of channels vs. fairness

图 12 信道数目对公平性

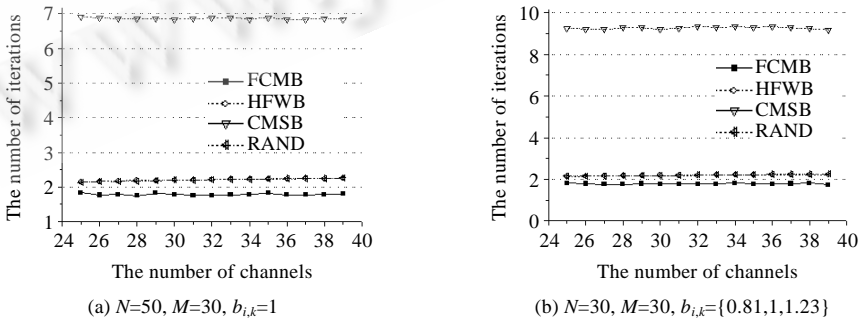


Fig.13 The number of channels vs. the number of iterations

图 13 信道数目与算法迭代次数

4.6 次用户干扰区域大小对算法性能的影响

图 14~图 16 描述了系统中次用户干扰区域半径变化给算法性能带来的影响,5 种算法的系统总带宽均随系统中次用户干扰半径的增大而下降(如图 14 所示);公平性方面,则随着系统中次用户数目的增加而下降(如图 15 所示),CMSB 的下降幅度最大,但是理论上的带宽最优化算法在次用户干扰半径不断增加时却表现出了先降后升的现象(仿真中,在干扰半径大于 5 以后出现公平性上升);收敛性方面,5 种算法的迭代次数均在次用户的干扰半径为 2 时出现一个小幅度的增加,之后便一直处于下降的情形(如图 16 所示),这是因为干扰半径过小时,用户间相对于某个信道存在干扰的概率较小,而干扰半径较大时,对次用户来说,可用信道数目急剧减少,而干扰半径为 2 时正是这两种情况的一个临界点.由图 14~图 16 可以看出,随着次用户干扰区域半径的增加,这也就意味着次用户可用信道数目的减少,无论信道是否具有相同吞吐能力以及系统规模大小,在系统总带宽、公平性和收敛性方面,FCMB 算法与 HFWB 算法的表现与前面 3 种情况下的仿真结果基本相同.

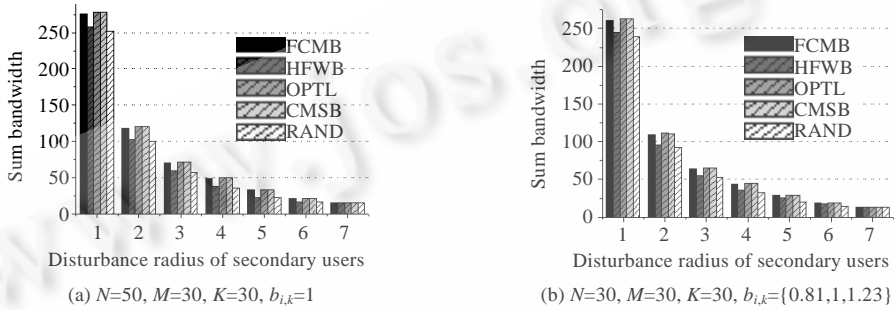


Fig.14 The radius of disturbance area vs. system sum bandwidth

图 14 干扰范围与系统总带宽

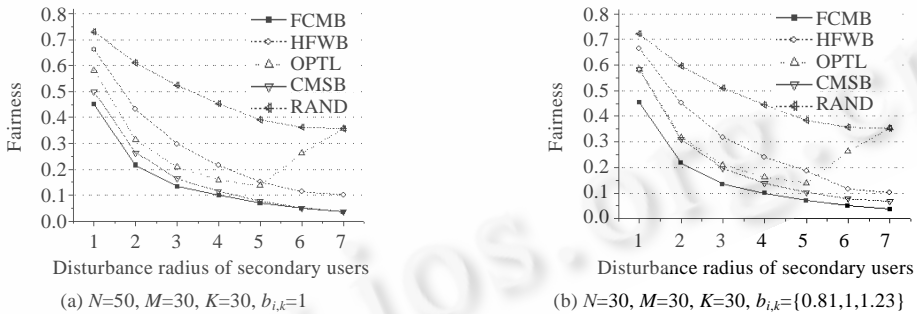


Fig.15 The radius of disturbance area vs. fairness

图 15 干扰范围与公平性

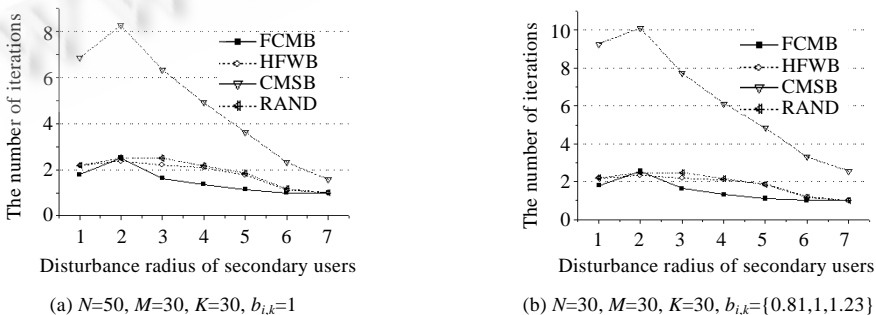


Fig.16 The radius of disturbance area vs. the number of iterations

图 16 干扰范围与算法迭代次数

## 5 结 论

针对开放式频谱系统中次用户抓住机会动态使用空闲信道这一问题,在综合考虑系统总带宽、收敛性能、公平性、易实现等因素后提出了 FCMB 和 HFWB 两种启发式的动态频谱分配算法.通过大量的仿真实验,就系统总带宽、公平性和收敛性 3 个方面的性能对 FCMB 算法和 HFWB 算法与现有的 CMSB 算法、RAND 算法以及以最大化系统总带宽为目标的理论最优算法进行了比较,并分析了系统中环境参数变化给算法性能带来的影响.实验结果表明,综合收敛性和系统总带宽性能来考量,FCMB 算法和 HFWB 算法在收敛性和公平性方面均有较好表现,其在系统总带宽、公平性和收敛性上与其他算法相比,无论在主、次用户数目变化,系统中信道总数还是在次用户干扰区域半径大小变化时,表现均基本相同:FCMB 算法虽然在系统总带宽性能上略低于 CMSB 算法和 OPTL 算法(小于 1%,如图 5、图 8、图 11 和图 14 所示),但其在收敛性能上要远远高于其他算法,尤其是比吞吐性能相近的 CMSB 算法在收敛性上提高了 300% 以上,而且,FCMB 算法的吞吐性能也远远高于 HFWB 算法和 RAND 算法;而 HFWB 算法在公平性性能方面远远优于 CMSB 算法、OPTL 算法和 FCMB 算法,虽然差于 RAND 算法,但是 HFWB 算法在系统总带宽性能上却高于 RAND 算法,而就收敛性而言,HFWB 算法远远优于 CMSB 算法 300% 以上,与 RAND 算法有基本相同的表现(或表现出非常微弱的优势),仅略差于 FCMB 算法.此外,大量的仿真和对比分析也给实际应用中不同需求下选取分配算法提供了参考.

## References:

- [1] Zheng H, Peng C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access. In: Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2005). IEEE Communications Society Press, 2005. 3132–3136.
- [2] Horvitz R. What is open spectrum. 2005. <http://www.volweb.cz/horvitz/os-info/whatis-OS.html>
- [3] Berger RJ. Open spectrum: A path to ubiquitous connectivity. ACM Queue, 2003,1(3):60–68.
- [4] Peng C, Zheng H, Zhao BY. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access. In: Mobile Networks and Applications. 2006,11(4):555–576.
- [5] Zhao J, Zheng H, Yang G. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. In: Proc. of the 2005 1st IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005). Baltimore: IEEE Press, 2005. 259–268.
- [6] Cao L, Zheng H. Distributed spectrum allocation via local bargaining In: Proc. of the 2nd Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Santa Clara: IEEE Communication Society Press, 2005. 475–486.
- [7] Liu X, Wang W. On the characteristics of spectrum-agile communication networks. In: Proc. of the 2005 1st IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005). Baltimore: IEEE Press, 2005. 214–223.
- [8] Berlemann L, Hiertz GR, Walke B, Mangold S. Strategies for distributed QoS support in radio spectrum sharing. In: Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2005), Vol.5. IEEE Communications Society Press, 2005. 3271–3277.
- [9] Wang W, Liu X. List-Coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Vehicular Technology (VTC2005-Fall). Dallas: IEEE Communications Society Press, 2005. 690–694.
- [10] Xing Y, Chandramouli R, Mangold S, Shankar SN. Analysis and performance evaluation of a fair channel access protocol for open spectrum wireless networks. In: Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2005), Vol.2. IEEE Communications Society Press, 2005. 1179–1183.
- [11] Katzela I, Naghshineh M. Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: A comprehensive survey. IEEE Personal Communications, 1996,3(3):10–31.
- [12] Ramanathan S. A unified framework and algorithm for channel assignment in wireless networks. Wireless Networks, 1999,3(2): 81–93.
- [13] Klein TE, Leung KK, Zheng H. Improved TCP performance in wireless IP networks through enhanced opportunistic scheduling algorithms. In: Proc. of the IEEE GLOBLECOM 2004. Dallas: IEEE Press, 2004. 2744–2748.



郝丹丹(1973—),女,江苏南京人,博士,主要研究领域为无线资源管理,无线网络跨层设计,无线网络服务质量。



程时端(1940—),女,教授,博士生导师,主要研究领域为无线网络性能,网络性能评估,网络服务质量。



邹仕洪(1978—),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线局域网,移动自组网,网络服务质量。