

## 基于干扰消减的认知无线电频谱分配算法

杜文峰, 刘亚涛, 明仲, 隋银雪

(深圳大学 计算机与软件学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 在认知无线电网络的频谱分配过程基础上, 提出了一种基于干扰消减的频谱分配算法。该算法通过将可用频谱分配给能够同时无干扰地接入同一频谱的所有认知用户来提高授权频谱的使用率。同时, 该算法参考各个认知用户在初始阶段的可用频谱数量来为未分配到频谱资源的认知用户进行频谱分配, 对频谱分配过程的公平性进行了优化。仿真结果表明, 该算法能够在认知用户数量较多、可用频谱紧张的情况下获得较高的吞吐量。

**关键词:** 认知无线电; 干扰消减; 频谱分配; 公平性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)05-0106-09

## Interference elimination based spectrum allocation algorithm for cognitive radio

DU Wen-feng, LIU Ya-tao, MING Zhong, SUI Yin-xue

(College of Computer Science and Software Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** With the spectrum allocation process in cognitive radio network, an interference elimination based spectrum allocation algorithm was proposed to improve the utilization of spectrum by allocating available spectrum to all cognitive users which can simultaneously access the same spectrum without interference. Meanwhile, this algorithm would allocate spectrum to cognitive user, which had not been assigned in previous allocation process, with reference to the amount of available spectrums in the initial stage to optimize the fairness of spectrum allocating process. Extensive simulation results show the proposed algorithm can achieve better throughput when the amount of available spectrum is far less than that of cognitive user.

**Key words:** cognitive radio; interference decrease; spectrum allocation; fairness

### 1 引言

随着无线通信技术的快速发展, 无线频谱资源变得十分稀缺, 已经无法满足日益增长的无线通信技术需求。然而, 根据美国 FCC 于 2003 年对无线频谱使用情况的调查报告<sup>[1]</sup>, 可以发现已分配的授权频谱的资源利用率普遍在 15% ~ 85% 范围内波动。2009 年, 中国移动研究院无线技术研究所对授权频谱的利用情况进行了实测, 结果表明已分配的

授权频谱资源的利用率很低, 多半频段的利用率不足 5%, 甚至出现空白频段<sup>[2]</sup>。因此, 如何提高授权频段的重复利用率, 缓解当前无线网络带宽资源紧缺的现状, 成为当前无线通信领域亟待解决的问题。认知无线电 (CR, cognitive radio) 正是在这样的环境下提出的一种频谱资源共享技术<sup>[3]</sup>。

认知无线电通过实时感知外部频谱的使用情况, 发现并利用闲置的授权频段(称为“频谱空穴”)进行数据传输, 实现频谱资源的动态共享。在认知

收稿日期: 2011-07-12; 修回日期: 2012-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61003271, 61170077); 深圳市基础研究基金资助项目(JC201005280427A)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61003271, 61170077); Strategy Grant of Shenzhen Science and Technology Department (JC201005280427A)

无线网络中存在着 2 类用户：主用户(PU, primary user)和认知用户(CU, cognitive user)。主用户是在指定频段上的法定授权用户；认知用户没有任何频谱使用授权，只是伺机占用主用户未使用的授权频段进行通信。

目前，已有部分研究针对认知无线电的频谱分配过程展开了讨论，通过分析多个相互竞争的认知用户之间的关系，将授权频谱分配给满足一定条件的认知用户使用。可以发现，现有的频谱分配算法在分配过程中主要以特定的目标函数为指导，并未考虑到频谱分配过程的公平性。此类算法在分配过程中以最大化目标性能为主导，可能将频谱资源优先分配给部分竞争力较强的认知用户，导致其他竞争力较弱的认知用户由于可用频谱被占用而无法接入。而此时，另外一些授权频谱资源由于没有认知用户接入而继续空置，产生“饿死”现象。

然而，在认知无线网络环境中，由于不同认知用户的接入方式或发射功率不一定相同，处于同一授权频谱覆盖范围内的多个认知用户在接入和使用频谱的过程中可能出现干扰或者能够共享使用。同时，授权频谱分配的先后次序也将影响频谱分配的最终结果。本文正是在此基础上，针对认知用户在接入授权频谱的竞争过程中所产生的冲突进行分析，提出了一种基于干扰消减的频谱分配算法(IESA, interference elimination based spectrum allocation algorithm)。该算法通过消减认知用户在接入频谱过程中存在的干扰，增加能够同时接入授权频谱的认知用户数量。同时，本算法将各个认知用户的可用频谱信息结合到频谱分配过程中，对分配过程的公平性进行了优化。

本文的后续内容组织如下：第 2 节介绍了当前认知无线电频谱分配问题的研究现状；第 3 节使用图论方式对频谱分配过程进行建模；本文提出的频谱分配算法将在第 4 节给出；第 5 节对比了本算法与颜色敏感图着色算法的运行性能，并给出了模拟仿真结果；第 6 节是结束语。

## 2 相关研究

在认知无线网络中，认知用户由于所处位置不同，可能被多个授权频谱所覆盖，能够感知和接入多个授权频谱。

目前，针对认知无线电频谱分配方面的文章主要以图着色理论模型为基础。文献[4]提出了基于列

表着色的分布式贪婪算法，以最大频谱分配数量为目标，将认知用户同其他认知用户所产生干扰的数量定义为该认知用户的度，并优先对度较小的认知用户进行频谱分配。以认知用户之间的干扰度来进行频谱分配能够优化认知用户占用频谱的数量，但分配结果中有可能出现一个用户占用多个频谱的情况，导致其他多个认知用户无法接入。同时，该算法缺乏对干扰和频谱效益的差异性讨论；Haitao Zheng 等在文献[5]中利用不同认知用户在使用频谱资源时所产生的效益和干扰差异性，提出了一种以最大效益为目标的颜色敏感图着色算法(CSGC, color sensitive graph coloring algorithm)。该算法将频谱效益与用户干扰度的比值定义为标号，并优先对标号最大的节点进行分配，提高系统的频谱效益。然而，在该算法中产生频谱效益较大的认知用户往往由于竞争优势抢占产生频谱效益较小的认知用户所能够使用的频谱资源，无法保证认知用户的最大频谱接入数量；文献[6]中设计了一种启发式规则来进行频谱分配和频谱资源调度，实现了以网络公平性为目标的频谱共享。Anh Tuan Hoang 等在文献[7]中采用功率控制方法来计算不同认知用户的信噪比，通过降低认知用户对授权用户的干扰，对频谱使用过程进行优化。然而，该算法主要针对认知用户接入授权频谱的干扰问题进行讨论，没有对多个认知用户同时接入相同授权频谱时所存在的同频干扰问题进行分析；文献[8]以认知用户的接入公平性为参考，提出了一种基于流量感知的认知无线网络动态频谱分配算法。该算法通过感知不同节点的网络流量，有选择地为认知用户进行频谱分配，在一定程度上提高了认知用户使用频谱资源的公平性；文献[9]通过建模认知用户和主用户的行为模式，对认知用户阻塞主用户，以及同主用户产生接入冲突的概率进行预测。通过将不同认知用户分配到不同的授权频段，能够在一定程度上提高网络的吞吐量，同时保证频谱分配的公平性。

可以发现，目前已有的频谱分配算法主要以系统最大频谱效益为目标，优先将可用频谱分配给产生较大频谱效益的认知用户。尽管该类算法能够有效地解决接入冲突问题，但仍缺少对多个认知用户共享同一频谱问题的讨论。同时，现有部分频谱分配算法优先对满足一定目标的认知用户进行频谱分配，可能导致其他认知用户由于可用频谱被占用，而另外一些可用授权频谱资源由于没有被接入

而继续空置的情况,限制了接入到可用授权频谱中的认知用户数量。

另外,已有的频谱分配算法主要强调认知用户之间的同频干扰,不允许多个认知用户共享接入同一个授权频谱。然而,由于认知用户的接入方式或发射功率不一定相同,处于同一授权频谱覆盖范围内的多个认知用户在接入和使用频谱的过程中由于互不干扰,可能共享使用该频谱。本文以认知节点的发射功率,即信号传输距离为例来定义不同认知用户之间的同频干扰。当认知用户之间的距离低于一定阈值时,同一频谱覆盖范围内的认知用户将由于接入干扰而不能共享该频谱资源;反之,当认知用户之间的距离超过某一阈值时,认知用户的频谱接入过程将不存在干扰,可以共享该授权频谱进行通信,如图 1 所示。认知节点 1 和认知节点 2 可以同时接入授权频段 A,而认知节点 3 与认知节点 1 和认知节点 2 在接入频谱过程中将产生同频干扰。

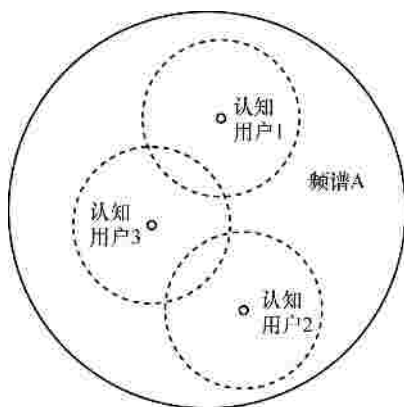


图 1 认知无线网络频谱覆盖及接入

为了进一步优化认知无线网络的频谱分配过程,使得多个互不干扰的认知用户能够共享同一授权频段,并且保证频谱分配过程中的公平性,本文在已有认知无线电干扰消除问题分析的基础上,进一步针对同频干扰消除问题进行优化,通过对能够共享同一授权频谱的多个认知用户情况进行分析,结合频谱干扰和频谱效益的差异性,在增加认知用户接入数量的同时提高系统的频谱利用率。

### 3 系统模型与假设

假设认知无线网络中的授权频谱可以划分为  $M$  个互不干扰的正交频段,即信道,且每个信道的传输频率和覆盖范围各不相同。其中,信道  $j$  用  $SR_j$  表示,  $1 \leq j \leq M$ 。认知无线网络中存在着  $N$  个

认知节点,每个认知节点代表一个认知用户。其中,第  $i$  个认知节点用  $CR_i$  表示,  $1 \leq i \leq N$ ; 认知用户由于所处位置不同,则可能处于多个授权频谱的覆盖范围内。认知用户可以接入到其可感知的任何一个可用授权频谱进行通信。认知用户之间由于接入技术或传输距离等原因,在接入同一信道时可能会产生频谱干扰。

同时,本文假设在频谱分配过程中,认知无线网络环境不发生改变,即认知用户的位置、可用授权频段不发生变化。

为了描述认知无线网络的频谱分配过程,本文同样利用图着色理论来描述整个认知无线网络场景。类似文献[5],本文引入了可用矩阵、效益矩阵、干扰矩阵和分配矩阵。同时,本文对干扰矩阵进行了扩展,使其能够更好地描述现实环境。

1) 可用矩阵  $L = \{l_{ij} | l_{ij} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$ ,  $1 \leq i \leq N$ ,  $1 \leq j \leq M$ , 是关于认知用户和授权频谱资源可用关系的二维矩阵。其中,行标  $i$  表示认知用户  $CR_i$ , 列标  $j$  表示授权频段  $SR_j$ 。如果认知用户  $CR_i$  可以接入授权频谱  $SR_j$ , 则记  $l_{ij} = 1$ ; 否则,记  $l_{ij} = 0$ 。

2) 效益矩阵  $B$  与可用矩阵  $L$  对应,以  $b_{ij}$  表示认知用户  $CR_i$  接入频谱资源  $SR_j$  时所产生的频谱效益。若  $CR_i$  无法接入频谱  $SR_j$ , 即当  $l_{ij} = 0$  时,记  $b_{ij} = 0$ 。

3) 干扰距离矩阵  $q = \{q_i\}$ ,  $1 \leq i \leq M$ , 用实数表示不同授权频段的干扰阈值大小,是关于授权频谱干扰阈值的一维向量。其中,  $q_i$  表示授权频段  $SR_i$  所能忍受的干扰阈值。

4) 干扰矩阵  $C$  用三维矩阵  $C = \{c_{i,j,k}\}_{M \times N \times N}$  表示任何 2 个认知用户在共享某一授权频谱资源时的干扰度。其中,行标  $i$  代表授权频段  $SR_i$ ,  $j, k$  分别代表认知用户  $CR_j$  和认知用户  $CR_k$ 。

同时,与 CSGC 算法只是简单地用 0,1 表示干扰矩阵元素值的方法不同,本文用区间[0,1]内的实数值代替干扰矩阵的元素值。若认知用户无法同时接入某一授权频谱,则认为这些认知用户在该频谱上的干扰度为 1; 如果认知用户可以共享某一授权频谱,且认知用户之间的距离小于对应授权频谱的干扰距离,则令认知用户在该频谱上的干扰度为干扰距离与实际距离的比值;相反,如果认知用户之间的距离大于该授权频谱的干扰距离,则令认知用户在该频谱上的干扰度值为 0。

5) 分配矩阵  $A$  记录了频谱分配算法的运行结

果，用矩阵  $A=\{a_{ij} | a_{ij} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$  表示， $1 \leq i \leq N$ ， $1 \leq j \leq M$ 。如果认知用户  $CR_i$  分配到频谱资源  $SR_j$ ，则记  $a_{ij}=1$ ；否则， $a_{ij}=0$ 。

根据上述数学描述，可以把认知无线网络抽象成图论模型  $G=(V,E,B)$ 。顶点  $V$  代表认知用户集合；边的集合  $E$  记录能够同时接入某一授权信道时发生干扰的 2 个认知用户之间的关系；集合  $B$  表示各个顶点可选的颜色集合(即可用频谱资源列表)和各个颜色所对应的权重(即频谱效益)。

#### 4 基于干扰消减的频谱分配算法

为了充分利用可用频谱资源，保证能够共享同一频谱资源的认知用户数量最大化，本算法首先对可共享同一频谱资源的认知用户进行频谱分配，然后再将剩余的可用频谱资源分配给尚未获得频谱资源的认知用户。

根据可用矩阵  $L$  和干扰矩阵  $C$  的定义，可以得到以下结论。

**定理 1** 当  $l_{i,m}+l_{j,m} = 1$  时，必定满足  $c_{m,i,j}=0$ 。

**定理 2** 当  $c_{m,i,j}=1$  时，认知用户  $CR_i$  和认知用户  $CR_j$  在共同使用授权频谱  $SR_m$  时产生干扰，且必定存在  $l_{i,m}=l_{j,m}=1$ 。

定义能够接入同一授权频段而不发生干扰的 2 个认知用户为共享用户对。可以发现，当且仅当  $l_{i,m}+l_{j,m} > 1$ ，且  $c_{m,i,j}=0$  时，认知用户  $CR_i$  和认知用户  $CR_j$  可以共享授权频谱  $SR_m$ ，构成一个共享用户对，记为  $\langle CR_i, CR_j \rangle$ 。

由于认知用户在指定频段下的干扰关系是对称的，将干扰矩阵  $C$  指定频谱下三角部分值为 0 的元素置为 1，将值为 1 的元素置为 0，除去对角线上的元素后，可以得到所有值为 1 的元素所对应的行标和列标构成了该频谱下的所有共享用户对。

然而，由于认知用户可能处于多个授权频谱的覆盖范围之内，多个共享用户对在接入同一授权信道时可能存在相互干扰，以及不同共享用户对中出现认知用户重叠。为了充分利用频谱资源，必须对共享用户对进行再次优化，得到能够共享某一授权频谱资源的最多认知用户集合。因此，本文进一步将能够同时共享同一频谱的所有认知用户所组成的集合定义为在该频谱下的最大共享独立集；记授权频谱  $SR_m$  的最大共享独立集用  $G_m$  表示。

为了最大化地利用授权频谱资源，必须找出每个频段中互不产生干扰的所有认知用户，并获取各

个授权频谱对应的最大共享独立集。因此，本算法首先对各个频谱下的所有共享用户对进行遍历。

假设  $\langle CR_i, CR_j \rangle$  为频谱  $SR_m$  下的共享用户对。在遍历过程开始时，可以认为授权频段  $SR_m$  的最大共享独立集的初始值  $G_m=\{CR_i, CR_j\}$ 。

假设授权频段  $SR_m$  的所有共享用户对中存在认知用户  $CR_k$ ， $1 \leq k \leq N$ ， $k \neq i$ ， $k \neq j$ ，且定义认知用户  $CR_k$  的冲突度为该节点与频谱  $SR_m$  的当前最大共享独立集  $G_m$  中元素发生干扰的数量。

可以发现，认知用户  $CR_k$  与当前最大共享独立集  $G_m$  可能存在以下 3 种场景，如图 2 所示。图中，圆圈中的字母  $i, j, k$  分别表示认知用户  $CR_i, CR_j$  和  $CR_k$ ，字母  $m$  表示频谱资源  $SR_m$ ；实线表示其两端的认知用户在使用频谱资源时存在干扰，而虚线表示其两端的认知用户可以同时共享该频谱资源。

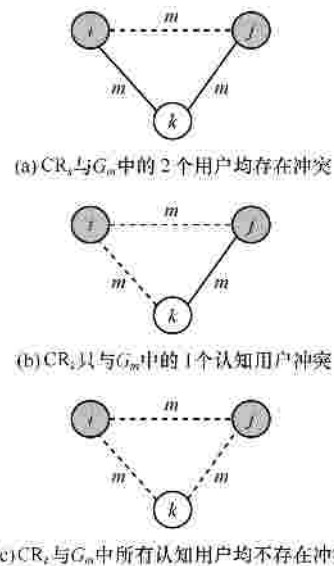


图 2 授权频谱  $SR_m$  下的认知用户共享冲突

为了构建最大共享独立集，本算法针对以上 3 种情况进行了区分处理。

1)  $\forall CR_i \in G_m, CR_j \in G_m, i \neq j$ ，且  $\exists c_{m,i,k}=1, c_{m,j,k}=1$

认知用户  $CR_k$  与共享独立集  $G_m$  中的 2 个认知用户  $CR_i, CR_j$  均存在冲突，如图 2(a)所示。 $CR_k$  与集合  $G_m$  的冲突度为 2，集合  $G_m$  内的元素保持不变。

2)  $\forall CR_i \in G_m, i \neq j$ ，且  $\exists CR_j \in G_m$ ，满足  $c_{m,i,k}=0, c_{m,j,k}=1$

认知用户  $CR_k$  只与独立集  $G_m$  中的一个认知用户存在冲突，即  $CR_k$  与集合  $G_m$  的冲突度为 1，如图 2(b)所示。此时，本算法将比较认知用户  $CR_j$  和认知用户  $CR_k$  在频谱  $SR_m$  下产生的频谱效益。若

$b_{j,m} > b_{k,m}$ , 则集合  $G_m$  保持不变; 否则, 以认知用户  $CR_k$  替换认知用户  $CR_j$ ,  $G_m = G_m - \{CR_j\} + \{CR_k\}$ 。

3)  $\forall CR_i \in G_m$ , 满足  $c_{m,i,k} = 0$

此时, 认知用户  $CR_k$  与独立集  $G_m$  中的所有认知用户均不存在冲突, 即  $CR_k$  与集合  $G_m$  的冲突度为 0, 如图 2(c) 所示。此时, 本算法将把认知用户  $CR_k$  归入频谱  $SR_m$  的最大共享独立集, 即  $G_m = G_m + \{CR_k\}$ 。

以上过程不断迭代, 直至所有的共享认知用户遍历结束, 得到频谱  $SR_m$  的最大共享独立集。

由于最大共享独立集中的认知用户在接入同一频谱时不存在相互干扰, 为了有效利用频谱资源, 本算法优先为含有认知用户数量最多的最大共享独立集中的认知用户分配频谱, 即将频谱资源同时分配给最大共享独立集中的所有认知用户。

设独立集  $G_{\max} = \{CR_i, CR_j, CR_k, \dots\}$  为包含最多认知用户的最大共享独立集, 且  $SR_{\max}$  为该集合所对应的频谱资源。根据本算法的执行原理, 首先将频谱  $SR_m$  分配给独立集  $G_{\max}$  中的所有认知用户, 并在分配矩阵  $A$  中设置相应的频谱分配结果, 即令:

$$a_{i,\max} = a_{j,\max} = a_{k,\max} = \dots = 1$$

同时, 更新集合  $G_{\max}$  中所有认知用户在可用矩阵  $L$  中的频谱可用性, 将可用矩阵  $L$  中的对应行元素置为 0。即

$\exists CR_i \in G_{\max}, \forall m, 1 \leq m \leq M, m \neq \max$ , 则令  $l_{i,m} = 0$

为共享独立集  $G_{\max}$  中的认知用户分配完频谱资源后, 本算法将继续查找频谱  $SR_{\max}$  下与集合  $G_{\max}$  中认知用户产生冲突的所有认知用户, 并更新其在频谱  $SR_{\max}$  下的可用状态。即

对于  $\forall n, 1 \leq n \leq N$ , 且  $CR_i \in G_{\max}$ , 若  $\exists c_{\max,i,n} = 1$ , 则令  $l_{n,\max} = 0$ 。

然而, 由于认知用户可能被多个授权频谱所覆盖, 同一个认知用户可能出现在不同授权频谱的最大共享独立集中。因此, 本算法进一步对频谱分配过程进行优化, 将已分配到频谱资源的认知用户从其他授权频谱的最大独立共享集中删除。即

对于  $\forall m, 1 \leq m \leq M, m \neq \max$ , 若  $\exists CR_i \in G_{\max}$ , 且  $CR_i \in G_m$ , 则  $G_m = G_m - \{CR_i\}$

以上过程不断迭代, 直至将所有已分配到频谱资源的认知用户从其他授权频谱的最大共享独立集中删除为止。

为能够共享频谱的认知用户分配频谱后, 本算

法将进一步为未分配到频谱资源的其他认知用户分配频谱资源。令已分配到频谱资源的认知用户集合为  $G_I = \{CR_i, CR_j, CR_k, \dots\}$ , 且所有未分配到频谱资源的认知用户集合为  $G_{II} = \{CR_x, CR_y, CR_z, \dots\}$ 。

在为集合  $G_{II}$  内的认知用户分配可用频谱时, 剩余的可用频谱将随着频谱分配过程的进行而不断变化。为此, 本文进一步定义认知用户在进行频谱分配时的可用频谱为该认知用户的初始可用频谱; 同时, 定义干扰度  $D_{x,m}$  为在集合  $G_{II}$  内的认知用户  $CR_x$  与其他认知用户在频谱  $SR_m$  中产生的干扰量。

结合效益矩阵  $B$  和干扰矩阵  $C$ , 可以得到所有未分配到频谱资源的认知用户的初始可用频谱和干扰度。即对于  $\forall m, 1 \leq m \leq M, \exists CR_x \in G_{II}$  时, 可以得到以下结论。

结论 1 当  $b_{x,m} = 0$  时, 频谱  $SR_m$  不是认知用户  $CR_x$  的初始可用频谱, 且认知用户  $CR_x$  在频谱  $SR_m$  下的干扰度为 0。

结论 2 当  $b_{x,m} > 0$  时, 频谱  $SR_m$  是认知用户  $CR_x$  的初始可用频谱。认知用户  $CR_x$  在频谱  $SR_m$  下的干扰度为:  $D_{x,m} = c_{m,x,i} + c_{m,x,j} + c_{m,x,k} + \dots$ , 其中,  $CR_i, CR_j, CR_k, \dots \in G_I$ 。

令  $number(CR_x)$  为认知用户  $CR_x$  的可用频谱数量, 结合可用矩阵  $L$  可以得到  $number(CR_x)$  为

$$number(CR_x) = l_{x,1} + l_{x,2} + l_{x,3} + \dots + l_{x,M}$$

通常, 可用频谱数量较多的认知用户获得频谱的概率相对较高。为了保证更多的认知用户可以接入授权频谱, 本算法将从集合  $G_{II}$  中优先选择可用频谱数量最少的认知用户进行分配, 直到所有认知用户被遍历, 或者所有频谱资源被分配为止。

令  $CR_{\min}$  为所有未分配到频谱资源的认知用户中可用频谱数量最少的认知用户, 且其可用频谱数量  $s$  为

$$s = \min(number(CR_x), number(CR_y), \dots)$$

同样, 根据  $s$  值的不同, 本算法将对认知用户  $CR_{\min}$  进行区分处理。

1) 若  $s = 0$ , 即认知用户  $CR_{\min}$  无可用频谱资源。此时, 认知用户  $CR_{\min}$  接入任何一个初始可用频谱都会对其他已分配到频谱资源的认知用户产生干扰。即对于  $\forall m, 1 \leq m \leq M, D_{\min,m} > 0$

根据  $D_{\min,m}$  与  $q_m$  的关系, 又可以分为 2 种情况。

a) 对于  $\forall m, 1 \leq m \leq M, b_{\min,m} > 0$ , 若干扰度

$D_{\min,m} > q_m$ ，则  $G_{II} = G_{II} - \{CR_{\min}\}$ ，本算法将不再为认知用户  $CR_{\min}$  分配频谱资源；

b) 对于  $\forall m, 1 \leq m \leq M, b_{\min,m} > 0$ ，以及  $CR_i \in G_I$ ，若  $\exists D_{\min,m} = q_m, c_{m,i,\min} = 1$ ，且  $b_{\min,m} > b_{i,m}$ ，则将频谱资源  $SR_m$  分配给认知用户  $CR_{\min}$ ，取消认知用户  $CR_i$  对频谱  $SR_m$  的使用权，即置  $a_{i,m} = 0, a_{\min,m} = 1$ ；此时，对认知用户  $CR_{\min}$  的分配结果不会对其他认知用户造成影响。

2) 若  $s=1$ ，即仅有唯一的频谱资源可供认知用户  $CR_{\min}$  接入

本算法将把该频谱资源分配给认知用户  $CR_{\min}$ ，即对于  $\forall m, 1 \leq m \leq M$ ，若  $\exists l_{\min,m} = 1$ ，令  $a_{\min,m} = 1$ 。

3)  $s > 1$ ，即认知用户  $CR_{\min}$  可以在无干扰的情况下接入多个可用授权频谱

可用矩阵  $L$  中存在  $l_{\min,1} + l_{\min,2} + \dots + l_{\min,M} > 1$ 。此时，本算法将找到能够使认知用户  $CR_{\min}$  产生最大频谱效益的频谱  $SR_m$ ，并将频谱  $SR_m$  被分配给该认知用户。即  $\exists m, 1 \leq m \leq M$ ，且  $l_{\min,m} = 1$ ，使得  $b_{\min,m} = \max(b_{\min,1} \times l_{\min,1}, b_{\min,2} \times l_{\min,2}, \dots, b_{\min,M} \times l_{\min,M})$ ，则令  $a_{\min,m} = 1$ 。

同时，本算法将继续更新可用矩阵  $L$ ，将已分配到频谱资源的认知用户所在行的元素置为 0。即

$$l_{\min,1} = l_{\min,2} = l_{\min,3} = \dots = l_{\min,M} = 0$$

另外，本算法将更新其他认知用户在频谱  $SR_m$  中的可用状态，即对于  $\forall x, 1 \leq x \leq N$ ，如果  $\exists CR_x \in G_{II}$ ，且  $\exists c_{m,\min,x} = 1$ ，则令  $l_{x,m} = 0$ 。

最后，将已分配到频谱资源的认知用户从集合  $G_{II}$  中删除，并将已分配到频谱资源的认知用户添加到集合  $G_I$  中。即

$$G_{II} = G_{II} - \{CR_{\min}\}, G_I = G_I + \{CR_{\min}\}$$

以上分配过程不断迭代，直至集合  $G_{II}$  为空或所有授权频谱资源被分配完为止。

本算法的核心伪代码如图 3 所示。

当前，可以通过集中式和分布式 2 种方式来实现上述频谱分配过程。

### 1) 集中式

如果认知无线网络中存在一个中心调度节点负责为所有认知用户分配频谱资源，则本算法的实施过程将非常直接。中心调度节点收集图中所有节点的可用频谱、频谱效益、接入干扰等信息，并执行本文所提出的频谱分配算法，将分配结果反馈给所有认知用户。

```
// spectrum process of IESA scheme
select  $G_{max}$  from ( $G_1, G_2, \dots, G_M$ )
allocate spectrum  $SR_{max}$  to all users in  $G_{max}$ 
update Allocation Matrix  $A$ 
update Matrix  $L, B$  and  $C$ 
delete  $G_{max}$  and allocated users in  $G_k$ 
update  $G_1, G_2, \dots, G_M$ 
compare  $number(CR_s), number(CR_s), \dots, number(CR_N)$ 
select  $s_{min}$  from ( $number(CR_s), number(CR_s), \dots$ )
if  $s = 1$  select current spectrum band as SR
if  $s = 0$ 
compare interference with current spectrum bands
select SR which makes the lowest interference
If  $s > 1$ 
compare benefits with current spectrum bands
select SR which has the highest benefit
allocate current SR to current CR
```

图 3 算法的核心伪代码描述

### 2) 分布式

认知无线网络中的各个节点将向其所有邻居节点发送位置、可用频谱、频谱效益等信息，各节点分别构建全网可用矩阵、效益矩阵和干扰矩阵。通过执行本文提出的干扰消减算法，各个节点将各轮分配结果反馈给其邻居，并更新分配矩阵、可用矩阵。该步骤不断迭代，直到所有频段资源被分配或者所有认知用户都得到可用频谱为止。

## 5 算法性能分析及仿真实验

根据前文所述，CSGC 算法为了确保系统频谱效益，在频谱分配过程中优先将频谱资源分配给标号最大的认知用户，其算法复杂度为  $O(n^2)$ 。本文提出的 IESA 算法则需要首先找到能够共享同一频段的多个认知用户进行频谱分配，然后再对未分配到频谱资源的认知用户进行频谱分配，算法复杂度为  $O(n^2)$ 。因此本算法在复杂度上相对于 CSGC 算法并未有实质性的增加。

目前，对认知无线电频谱分配算法的性能评估主要从系统频谱效益和网络公平性等角度进行。

1) 系统频谱效益是指所有分配到频谱资源的认知用户在相应频段上贡献的频谱效益总和。

利用分配矩阵  $A$  与效益矩阵  $B$ ，可以得到频谱分配过程结束后所取得的系统频谱效益  $U_{sum}$ 。

$$U_{sum} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} b_{ij}$$

2) 网络公平性则体现了将频谱资源分配给认知用户的均衡程度<sup>[9]</sup>。

可以发现，网络公平性  $p_a$  可由用户分配率表

示,即所有分配到频谱资源的认知用户占系统认知用户总量的比例。其计算方法如下:

$$p_a = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij}}{N}$$

为了验证 IESA 算法的运行性能,本文分别对认知用户数量多于和少于授权频谱总量的场景进行了分析。本文采用 Java 语言对 IESA 算法与 CSGC 算法进行了模拟实现,对 2 种算法的系统频谱效益和网络公平性等性能指标进行了比较。在模拟过程中,各个授权频谱的频谱空穴随机生成,认知用户之间的干扰度由处于同一授权频段的认知用户之间的距离和授权频谱的干扰阈值决定。

图 4 给出了 IESA 算法和 CSGC 算法在授权频谱数量为 10 的认知无线网络中所对应的用户分配率。可以看出,当认知用户数量大于可用频谱总数时,CSGC 算法和 IESA 算法对认知用户的满足程度随着认知用户数量的增加而下降,但 IESA 算法在整个模拟过程中相对 CSGC 算法能够满足更多认知用户的频谱接入。当  $M=10, N=35$  时,CSGC 算法的用户分配率仅为 65%,而 IESA 算法能够使 85% 的认知用户获得频谱资源。

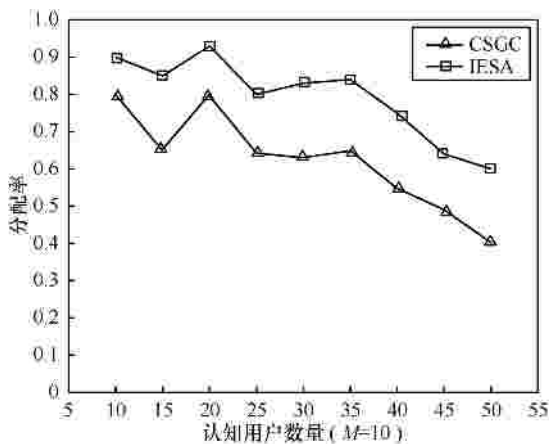


图 4 M 为 10 的用户分配率

与此同时,图 5 给出了 2 种频谱分配算法在  $M=10$  时的系统频谱效益。可以看到,2 种算法的系统频谱效益随着认知用户数量的增加而不断递增。当认知用户数量小于 20 时,CSGC 算法可以获得较好的系统频谱效益。然而,当认知用户数量大于 20 时,IESA 算法的系统频谱效益相对较优。可以得到,当认知用户数量多于可用授权频谱总数时,

IESA 算法可以在获得较好认知用户接入数量的同时,取得较优的系统频谱效益。

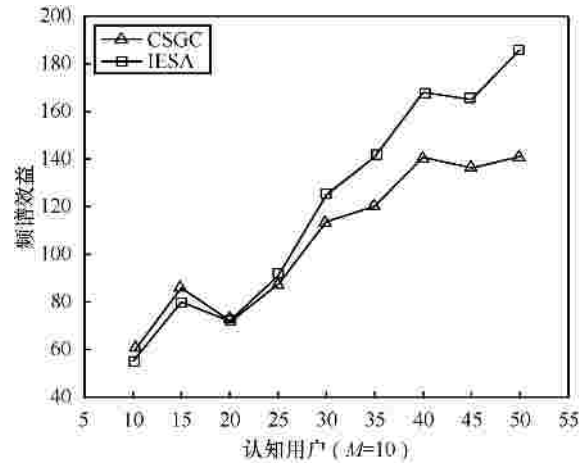


图 5 M 为 10 的系统频谱效益

当授权频谱数量增加到 50,且认知用户的数量从 10 增加到 50 时,实验得到 2 种算法对用户的分配率均为 100%。因此,当认知用户数量小于系统的可用频谱总数时,IESA 算法相对 CSGC 算法在认知用户接入数量方面并没有表现出一定的优势。

图 6 给出了 2 种频谱分配算法在授权频谱总数大于认知用户数量时所取得的系统频谱效益。当授权频谱总数为 50 时,随着认知用户数量的不断增加,CSGC 算法所获得的系统频谱效益一直呈上升趋势,且均高于 IESA 算法所获得的系统频谱效益。并且,在认知用户数量增加的过程中,IESA 算法的系统频谱效益波动较大。

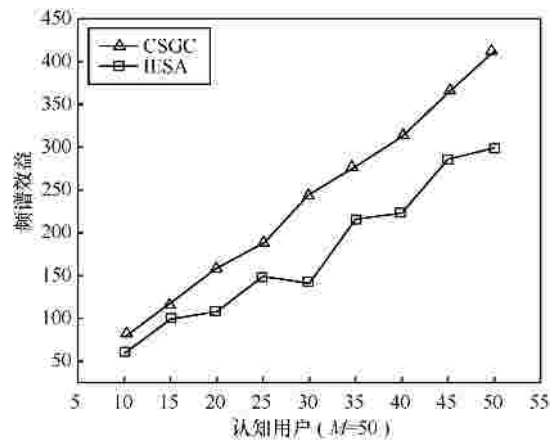


图 6 M 为 50 的频谱效益

为了进一步验证 IESA 算法,本文继续使用 Jing Zhong 和 Jialiang Li 于 2009 年开发的认知无线电仿真模块 CRCN<sup>[10]</sup>对 NS2 进行了扩展,并分别完成了

CSGC 算法和 IESA 算法在 NS2 下的仿真实验。

本文主要针对 CSGC 算法和 IESA 算法的分组传输时延、分组丢失率、信道干扰量和网络吞吐量等参数进行分析。在仿真实验中，10 对认知用户在 1 000×1 000 的区域内感知并接入 3 条授权信道进行 FTP 通信。认知节点的地理位置随机生成。

图 7 给出了 2 种频谱分配算法的实时信道干扰量仿真结果。可以看出，IESA 算法中的认知用户在接入相同授权信道的干扰量与 CSGC 算法的干扰量差别不太明显，仅在仿真过程的开始阶段和结束阶段有细微的差别。在 3s~7s 期间，2 种频谱分配算法的干扰量大致相同。IESA 算法在仿真初期的信道干扰量相对较高；在仿真结束阶段，CSGC 算法的信道干扰量相对较高。

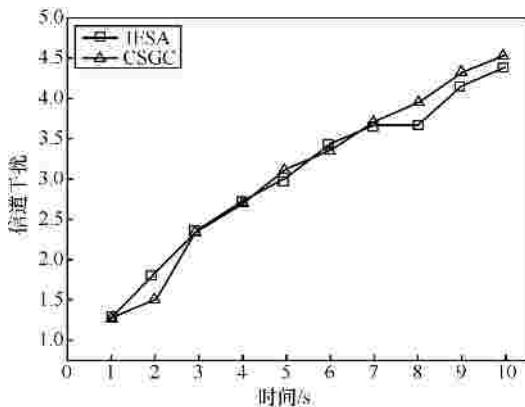


图 7 实时信道干扰量

图 8 给出了 2 种频谱分配算法在发送第 800 个到第 8 000 个数据分组过程中被正确接收的数据分组的实时累积时延。由于 IESA 算法是基于冲突消减的分配算法，且在同一信道中来自不同节点的数据分组的冲突退避时间较短，数据分组从发送到接收的累积时延都较小。可以看出，在整个仿真过程中 IESA 算法相对于 CSGC 算法在传输过程中引入的延迟较低。当数据分组传输数量达到 6 400 个时，IESA 算法的累积延迟才超过 CSGC 算法。

图 9 给出了 CSGC 算法和 IESA 算法在不同时间段内的传输分组丢失率。可以看到，在仿真初始阶段，各个认知用户间由于尚未建立起通信连接，认知用户发送或接收到的 RTS/CTS 控制分组数量较多；同时，由于多个 FTP 业务的启动时间相对一致，认知用户之间的控制分组发生冲突的概率较大，网络应用在 2 种频谱分配算法的仿真初期分组丢失率均相对较高。当  $t=4s$  时，CSGC 算法的分组

丢失率达到最大。传输过程启动 5s 后，不同授权信道上的数据分组不断积累，导致 2 种频谱分配算法的平均分组丢失率略呈上升趋势。可以发现，在整个仿真过程中 IESA 算法的平均分组丢失率都低于 CSGC 算法。

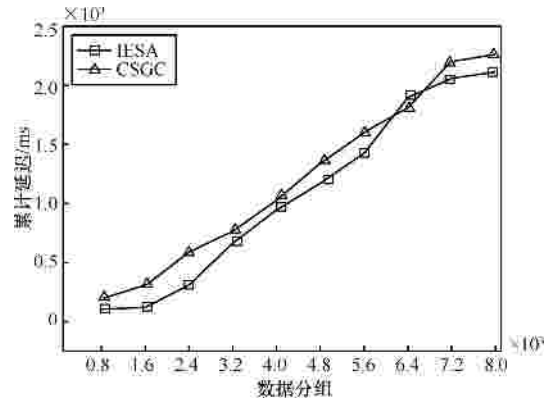


图 8 分组传输的累积时延

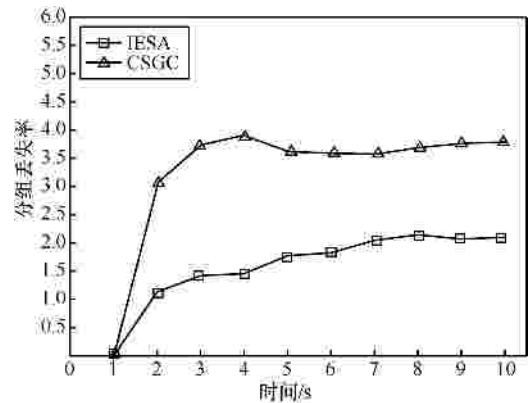


图 9 通进程中的分组丢失率

图 10 给出了运行 CSGC 算法和 IESA 算法的认知无线网络在仿真过程中的实时吞吐量。与传输分组丢失率的分布类似，通信初期由于大量控制分组的交互，网络吞吐量在短时间内急剧增长。当  $t=4s$  时，

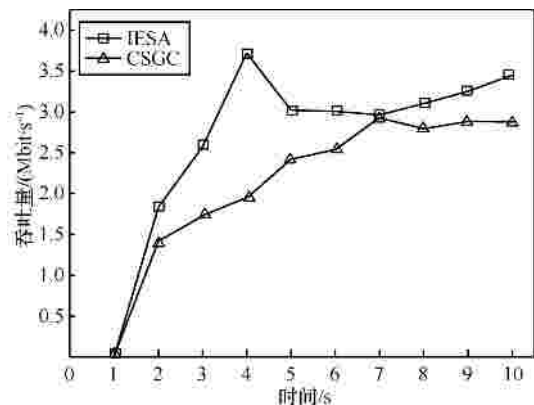


图 10 不同时间段的网络吞吐量

IESA 算法的吞吐量达到最大值；由于 IESA 算法在认知用户数量明显多于授权信道数量时能够满足更多的认知用户的接入需求，在整个仿真过程中，IESA 算法都能取得比 CSGC 算法更好的运行性能。

综合上述分析和仿真结果可以看出，CSGC 算法的目标是在避免干扰的前提下，最大化认知无线网络的频谱效益。在认知用户的接入数量和频谱效益之间，CSGC 算法更加侧重于认知用户利用所分配到的频谱资源所获得的最大频谱效益。IESA 算法则综合分析了不同认知用户的频谱共享程度和可用频谱数量，以最大化认知用户接入数量为目标。因此，CSGC 算法适合于频谱资源数量较多或系统对频谱效益要求较高的场景；而 IESA 算法则适合于对认知用户接入数量要求较高的场景或认知用户数量明显大于授权频谱总数的场景。

## 6 结束语

本文在综合分析了认知无线网络频谱接入、频谱干扰的基础上，提出了一种基于干扰消减的认知无线电频谱分配算法。该算法通过检测能够共享同一授权频段的所有认知用户，优化了接入授权频谱的认知用户数量。同时，该算法对未获得频谱资源的认知用户按照其可用频谱数量进行特殊处理，保证了频谱分配过程的公平性。

模拟和仿真实验结果表明，该算法能够在认知用户数量较多、可用频谱紧张的情况下对认知无线网络的频谱分配过程进行优化，能够增加接入授权频谱的认知用户数量，在一定程度上提高认知无线网络的频谱效益。

### 参考文献：

[1] STAPLE G, WERBACH K. The end of spectrum scarcity [J]. IEEE Spectrum, 2004, 41(3):48-52.

[2] 孟祥初. 通信产业网 [EB/OL]. <http://www.ccidcom.com/html/chanpinj-ishu/wuxiantongxin/200911/02-80768.html>,2009.

MENG X C. The usage survey of wireless spectrum[EB/OL]. <http://www.ccidcom.com/html/chanpinj-ishu/wuxiantongxin/200911/02-80768.html>,2009.

[3] JOSEPH M III, Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications [J]. MONET, 2001, 6(5):435-441.

[4] WANG W, LIU X. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks[A]. Proc of the 62nd IEEE Vehicu-

lar Technology Conference[C].Dallas, texas, USA, 2005. 690-694.

[5] ZHENG H, PENG C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[A]. Proc of the 2005 IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China, 2005. 3132 -3136.

[6] TANG J, MISRA S. Joint spectrum allocation and scheduling for fair spectrum sharing in cognitive radio wireless networks[J]. The International Journal of Computer Networks, 2008, 52(11):2148-2158.

[7] HOANG A, LIANG Y. Maximizing spectrum utilization of cognitive radio networks using channel allocation and power control[A]. IEEE 64th Vehicular Technology Conference[C]. Singapore, 2006. 1-5.

[8] XIE X, ZHOU T, DONG X. Traffic-demand dynamic spectrum access[A]. Proc of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing[C]. Chongqing, China, 2008.1-4.

[9] AHMED W, GAO J, FAUKNER M. Channel allocation for fairness in opportunistic spectrum access networks[A]. Proc of the 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Sydney, Australia, 2010.1-6.

[10] 林闯,李寅,万剑雄. 计算机网络服务质量优化方法研究综述[J]. 计算机学报,2011,34(1):1-14.

LIN C, LI Y, WAN J X. Optimization approaches for QoS in computer networks: a survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(1):1-14.

[11] Cognitive radio cognitive network simulator[EB/OL]. <http://stuweb.ee.mtu.edu/~ljialian/>.

### 作者简介：



杜文峰（1977-），男，云南曲靖人，博士，深圳大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为无线网络、带宽分配、多点通信等。



刘亚涛（1986-），男，河南汝州人，深圳大学硕士生，主要研究方向为认知无线电、频谱分配等。

明仲（1967-），男，江西宁都人，博士，深圳大学教授、硕士生导师，主要研究方向为移动计算、本体等。

隋银雪（1989-），女，辽宁大连人，深圳大学硕士生，主要研究方向为认知无线电、多点通信等。