

基于近邻传播的认知 Ad-hoc 网络分簇算法

张建照^{1,2} 姚富强² 赵杭生² 柳永祥² 王 凡^{1,2}

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (总参第六十三研究所 南京 210007)²

摘 要 针对认知 Ad-hoc 网络中可用信道动态异构和缺乏全网公共信道的特点,提出了一种基于限制消息交互次数的近邻传播模型(Affinity Propagation, AP)的分簇算法。该算法通过网络中相邻节点间的消息交互和更新,在相邻节点最多的信道上以可用信道最多的节点为簇首建立簇结构。为适应认知 Ad-hoc 网络环境的变化,降低分簇开销,算法限制 AP 消息的交互次数,实现了分簇算法的分布式快速收敛。仿真分析表明,算法降低了网络中的簇数目,提高了簇内平均可用信道和公共信道数目,从而为分布式频谱协作提供了高效的网络拓扑环境。

关键词 认知 Ad-hoc 网络,分簇,近邻传播模型,稳健性

中图分类号 TN915.01 **文献标识码** A

Clustering Algorithm for Cognitive Radio Ad-hoc Networks Based on Affinity Propagation

ZHANG Jian-zhao^{1,2} YAO Fu-qiang² ZHAO Hang-sheng² LIU Yong-xiang² WANG Fan^{1,2}

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(The 63rd Institute of General Staff, Nanjing 210007, China)²

Abstract According to the dynamic heterogeneity of available channels and scarcity of global common channels in cognitive radio Ad-hoc networks(CRAHNs), a distributed clustering algorithm CBAP-CMI(Clustering Based on Affinity Propagation with Controlled Message Interchanges) was proposed. Based on the interchange and update of messages among neighboring nodes, cluster structure was constructed on the channels shared by most local neighbors with the nodes holding most available channels as cluster heads. To reduce the clustering overhead as well as adapt to the variations in CRAHNs, CBAP-CMI refines the number of messages interchange and achieves rapid distributed clustering. The simulation results show that the proposed algorithm reduces the number of clusters and increases the average available channels for each link and the common channels in each cluster, providing an efficient topology for distributed spectrum cooperation in CRAHNs.

Keywords Cognitive radio Ad-hoc networks, Clustering, Affinity propagation, Robustness

1 引言

随着无线通信的发展,有限的频谱资源中的大部分已经分配完毕,可供新业务使用的频谱资源越来越稀缺,而已分配频谱的利用率却不高^[1]。认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术使非授权用户能够感知、识别、智能地接入当前空闲的频段,在不干扰授权用户的情况下满足通信需求,在提高频谱利用率、解决频谱稀缺问题上具有广阔的应用前景^[2]。以自组织方式组网的认知无线网络由于不依靠基础设施,具有自适应、自组织地根据干扰条件、设备密度、用户通信需求等网络环境进行频谱协作等优势,成为认知无线网络研究的重要内容^[3-5]。

在认知 Ad-hoc 网络(Cognitive Radio Ad-hoc Networks, CRAHNs)中,用户需要在没有网络基础设施可以使用的情

况下,通过分布式协作进行通信,分布式的多跳结构、动态的网络拓扑、多样的 QoS 需求以及可用信道随时间、空间不断变化等因素使得用户端到端通信性能面临着新的挑战^[6]。其中,由于授权用户分布和频谱使用情况的变化造成的动态多信道网络环境对分布式网络协议的设计提出了新的要求。在 MAC 层,专用的控制信道对于降低信道竞争和预约的开销及提高频谱的利用率具有重要意义,而在认知 Ad-hoc 网络中,可靠的全网公共控制信道很难保证^[7];在网络层,路由的建立和稳定性都需要相对稳定的拓扑结构信息作为保证^[8]。因此,在分析认知 Ad-hoc 网络特点的基础上,通过合理有效的分簇,建立相对稳定的拓扑结构,从而降低路由和 MAC 层控制开销,提高频谱利用率,是认知 Ad-hoc 网络中的一个关键问题。

传统 Ad-hoc 网络中的拓扑管理问题已经受到广泛关

到稿日期:2010-12-15 返修日期:2011-03-04 本文受国家自然科学基金项目(61072077),国家重大专项(2010ZX03006-002-01),通信抗干扰技术国家级重点实验室基金项目(9140C0203020905)资助。

张建照(1985—),男,博士生,主要研究方向为频谱管理、认知无线网络等, E-mail:lgjz2007@gmail.com;姚富强(1957—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为通信抗干扰、无线通信;赵杭生(1962—),男,博士后,研究员,主要研究方向为频谱管理;柳永祥(1974—),男,高级工程师,主要研究方向为频谱管理;王 凡(1984—),女,博士生,主要研究方向为频谱管理、认知无线网络等。

注^[9],主要通过节点的功率控制来满足网络连接度的要求。在认知 Ad-hoc 网络中,网络的拓扑结构不仅受到节点间相对位置和发射功率的影响,而且受到可用信道的制约,如果没有公共可用信道,即使在发射范围内也无法通信。因此,传统分布式网络中典型的最小 ID 算法、最高节点度数算法等分簇算法均不能直接应用于认知 Ad-hoc 网络。认知 Ad-hoc 网络的分簇算法需要利用节点在可用信道、地理位置等方面的相似性进行分簇。

减小簇数目和提高簇的稳健性,防止频繁簇重建,对于降低控制开销和端到端时延具有重要意义,是现有认知 Ad-hoc 网络分簇算法的两个重要的优化目标。文献[10]提出了以最小化簇数目为目标的分簇算法,初始分簇之后采用 LMDS (Local Minimal Dominating Set) 算法减小簇数目,但没有考虑簇的稳健性;文献[11]将簇节点数和公共信道数目乘积取最大作为优化目标,兼顾了稳健性,但是多个簇内公共信道被作为控制信道,限制了频谱利用率的提高;文献[12]提出了依次优先考虑公共信道数目、簇内成员数目的 Combo 算法。文献[13]将近邻传播模型 (Affinity Propagation, AP) 用于认知无线网络分簇,降低了簇数目,但是该算法以 AP 算法的收敛条件来判断是否收敛,其功率和时间开销过大,而且不能保证簇内节点存在公共信道。

针对以上问题,本文提出一种限制消息交互次数 AP 模型的分簇算法 CBAP-CMI (Clustering Based on Affinity Propagation with Controlled Message Interchanges)。CBAP-CMI 依据 AP 模型传递节点的可用信道和邻居数目信息,目标是在节点最多的信道上建立起以可用信道最多的节点为簇首的簇结构。算法限制了 AP 消息的交互次数,提高了收敛的速度,降低了开销;消息交互结束后,由可用信道最多的节点在邻居最多的信道上建立簇,从而保证了簇内至少有一个公共信道。

2 系统模型和假设

2.1 AP 算法模型

AP 算法是由 Frey 等人于 2007 年在“Science”杂志上提出的一种新型聚类算法^[14]。算法将所有数据点视为潜在的类代表点 (exemplar),通过数据节点间的相似度消息传递,选择出最优的类代表点,使得所有的数据点到其类代表点的相似度之和最大。AP 算法由于避免了传统聚类算法初始代表点选择带来的局限,因此可以更快地获得精确度更高的聚类结果,一经提出便受到广泛的关注和研究^[15,16]。

AP 算法以 n 个节点之间的相似度矩阵 $S=[s(i,j)]_{n \times n}$ 为输入, $s(i,j)$ 表示两个样本点 x_i 和 x_j 之间的相似度,也即两个点之间相互做类代表点的合适程度。为每个节点设置一个偏向参数 (preference) $p(i)=s(i,i)$,其值越大,则 i 作为类代表点的可能性越大。AP 算法初始一般假设所有数据点被选中成为类代表点的可能性相同,即设定所有 $s(i,i)$ 为相同的 p , p 值的大小影响到最终得到的类的个数,可以通过改变 p 值来寻找合适的类数目(一般情况下, p 值越大,则算法收敛后类数目越多,反之亦然)。

算法引入代表矩阵 $R=[r(i,k)]_{n \times n}$ 和适选矩阵 $A=[a(i,k)]_{n \times n}$, $r(i,k)$ 是由 x_i 发送到 x_k 的消息,表示在考虑了其潜在类代表点的情况下, x_i 选择 x_k 作为类代表点的合适

程度; $a(i,k)$ 是由 x_k 发送到 x_i 的消息,表示在考虑了其他选择 x_k 作为类代表点的数据节点的情况下, x_k 作为 x_i 的类代表点的合适程度。 $r(i,k)+a(i,k)$ 越大,则 x_k 作为 x_i 的类代表点的可能性越大。算法依靠节点之间的消息传递更新两个参数矩阵,选出最优的类代表点。更新公式如下:

$$r(i,k) \leftarrow s(i,k) - \max_{k' \neq k} \{a(i,k') + s(i,k')\} \quad (1)$$

$$a(i,k) \leftarrow \min_{i' \neq k} \{0, r(k,k) + \sum_{i' \neq (i,k)} \max(0, r(i',k))\} \quad (2)$$

$$a(k,k) \leftarrow \sum_{i' \neq k} \max(0, r(i',k)) \quad (3)$$

为避免算法震荡,引入阻尼因子 λ ,迭代时第 $t+1$ 次更新的值由当前值与第 t 次迭代更新值加权得到,即:

$$r(i,k)_{t+1} = (1-\lambda) \times r(i,k)_{t+1} + \lambda \times r(i,k)_t \quad (4)$$

$$a(i,k)_{t+1} = (1-\lambda) \times a(i,k)_{t+1} + \lambda \times a(i,k)_t \quad (5)$$

增大 λ 能够避免震荡,但同时会降低算法的收敛速度。若算法更新的信息在一定迭代次数内不变化,或者达到最大迭代次数或者类代表点连续若干次迭代中不变化,则算法收敛。收敛后,节点 i 选择

$$c_i = \arg \max_k \{r(i,k) + a(i,k)\} \quad (6)$$

作为类代表点。若 $c_i = i$,则 i 选择自己作为类代表点。

2.2 场景描述与假设

本文考虑认知 Ad-hoc 网络中的分簇问题。网络中最多有 N 个认知用户,每个用户有一个半双工认知无线电收发信机。所有可用频谱分为 $M=\{1,2,\dots,M\}$ 个性质相同的信道。授权用户工作在相同的区域,每个授权用户以随机 ON/OFF 模式使用固定的信道。认知用户可以在不干扰授权用户的情况下使用信道。每个认知用户通过感知获得可用信道集 $C_i = \{i_1, i_2, \dots, i_k\}$,并通过邻居发现算法^[17,18]获得一跳邻居集 N_i 及其可用信道 $\{C_k | k \in N_i\}$ 和一跳邻居信息 $\{N_k | k \in N_i\}$ 。假设网络变化相对较慢,在分簇过程中节点的可用信道和邻居信息不变。

3 基于近邻传播的认知 Ad-hoc 网络分簇算法

AP 算法是基于中心控制的聚类算法,通过数据节点间的并行消息传递来选择簇首,由中心节点控制算法收敛。在分布式的认知 Ad-hoc 网络中,没有中心控制节点,需要节点自主地判断。另一方面,在没有全网公共控制信道的认知 Ad-hoc 网络中,每一轮的信息传递都需要在所有的可用信道上跳转,需要的时间比较多。因此,CBAP-CMI 控制信息交互次数,以达到全网同时完成分簇和减小算法开销、适应动态网络环境的目标。

3.1 分布式聚类目标

在基于簇的 Ad-hoc 网络中,簇内通信的控制开销和时延优于簇间通信。因此,减小簇数目能够降低控制开销,提高网络性能。另一方面,可用信道和认知节点本身的变化带来的簇重建会造成额外的时延和控制开销;并且认知 Ad-hoc 网络是多信道网络,簇控制信道对于减小控制开销具有重要的意义。因此,为建立高效、稳定的簇结构,CBAP-CMI 算法的优化目标是在相邻节点最多的信道上以可用信道最多的节点为簇首建立簇结构。

3.2 相似度和偏向参数定义

认知 Ad-hoc 网络中的两个相邻节点,公共信道越多、公共邻居节点越多,则这两个节点组成的簇的大小和稳定性就

越好。因此,本文采用的节点相似度指标为:

$$s(i,j)=|C_i \cap C_j| \times (|N_i \cap N_j| + 2) \quad (7)$$

在基于簇的网络结构中,簇首节点对于簇的稳定性具有关键作用。一方面,每个簇内节点需要至少一个公共信道以减少通信开销;另一方面,可用信道簇首节点越多,则簇内通信性能越好。在 AP 算法中,可以通过为不同的节点设置不同的偏向参数来区别其作为代表点(即簇首)的偏向性,因此 CBAP-CMI 的偏向参数设置如下:

$$p(i)=-\alpha \times |C_i| \times \max_{m \in C_i} \{|N_i^m|\} \quad (8)$$

式中, N_i^m 表示节点 i 在可用信道 m 上的一跳邻居集合, α 是可变参数。

3.3 算法描述

网络中的所有节点同时开始分簇算法。由于没有公共控制信道,节点在 M 上同步跳转以交换信息,如图 1 所示。

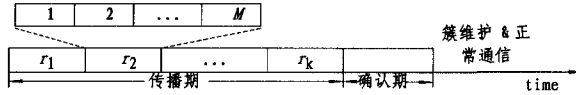


图 1 CBAP-CMI 示意图

算法包括初始化、传播期和确认期 3 个部分,由 $K+1$ 个循环组成,每个循环包括 M 个时隙。具体描述如下。

(1) 初始化

由于网络的分布式特点,每个节点仅计算和保存一跳邻居的相似度和适选度等信息,根据从邻居发现过程中获得的邻居信息使用式(7)初始化与一跳邻居的相似度,根据式(8)计算自己的偏向参数。初始化代表度和适选度: $r(i,k)_0 = s(i,k)$, $a(i,k)_0 = 0 (i \in N_i)$ 。

每个节点建立一个一跳邻居的信息列表 T_i ,其中每个表项存储一个邻居的信息。任意邻居 j 对应的表项 t_i^j 中所含的信息如表 1 所列。

表 1 t_i^j 所含信息

内容	意义
$a(i,j)$	最近更新时从 j 收到的适选度
$a(j,i)$	最近更新时发给 j 的适选度
$r(j,i)$	最近更新时从 j 收到的代表度
$r(i,j)$	最近更新时发给 j 的适选度

(2) 传播期

传播期包括 K 个循环,每个循环包括 M 个时隙,所有的节点同步地在公共信道集 M 上跳转。节点 i 在每个循环的操作如下:

若信道 $m \in C_i$,则节点 i 在信道 m 对应的时隙上以 CS-MA/CD 模式竞争发送和接收 Hello 消息,其中包含邻居信息列表中的信息;若 $m \notin C_i$,则 i 在该时隙保持静默。当该循环结束时,节点 i 根据收到的 Hello 消息依据式(1)~式(5)更新邻居信息列表 T_i 。

与原始 AP 算法的收敛条件不同,CBAP-CMI 算法限制消息传播的循环数为 K 。

(3) 确认期

在确认期开始时,所有节点 $i(i=1,2,\dots,N)$ 根据 T_i 中的信息判断自己是否适合作簇首。

若满足

$$r(i,i)+a(i,i) > r(i,k)+a(i,k), \forall k \in N_i \quad (9)$$

则 i 选择自己作为簇首,并从可用信道中选择

$$m = \arg \max_{m \in C_i} \{|N_i^m|\} \quad (10)$$

作为簇控制信道。簇首节点在确认期中可用信道对应的时隙发送簇首声明广播,其中包含簇控制信道号。

不满足式(9)的节点 j 选择作为一般成员,在确认期等待邻居节点的簇首广播。从收到的广播中选择满足

$$\begin{cases} c_j = \arg \max \{s(i,j)\} \\ m \in C_j \end{cases} \quad (11)$$

的节点作为自己的簇首,并向簇首发送确认消息,确认加入该簇。若 j 没有收到簇首广播,则在确认期结束时选择自己作为簇首,选择满足式(10)的信道作为簇控制信道。

簇结构建立后,所有的节点转到簇控制信道进行分布式频谱协作。同时,簇首通过簇控制信道维护和更新簇结构。

4 仿真分析

4.1 仿真场景和参数设置

仿真区域为一个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的平面区域,CR 用户的位置在区域内随机产生。网络中的信道总数为 $M=10$,在相同区域内,随机分布着 100 个授权用户,每个授权用户随机占用一个信道,其干扰半径为 15m。CR 节点的通信距离为 10m,可以在不干扰授权用户的情况下占用空闲信道进行通信。仿真时,设置参数 $\lambda=0.5$, $\alpha=0.3$ 。定义算法的评价指标如下:

- (1) 平均簇数目:分簇算法结束时网络中包含的簇数目;
- (2) 平均链路可用信道数目:网络中任意两个同簇相邻节点直接通信时可用的信道数目的平均值;
- (3) 平均簇内公共信道数目:每个簇内所有节点的平均公共信道数目。

4.2 仿真结果及分析

将 CBAP-CMI 与 LMDS 算法^[10]、SOC 算法^[11]及 Combo 算法^[12]在不同 CR 节点密度的情况下进行仿真比较。仿真结果是对 50 种随机产生的认知 Ad-hoc 网络拓扑运行分簇算法的平均值。

图 2 给出了网络中的平均簇数目的比较。由图可见,随着网络中节点密度的增加,几种算法产生的簇数目都随之增加。偏重优化簇公共信道的 SOC 算法和 Combo 算法簇数目最多,LMDS 算法次之,CBAP-CMI 参数 K 设置为 6 和 10 时,获得的簇数目接近,至少比其他算法少 18%。

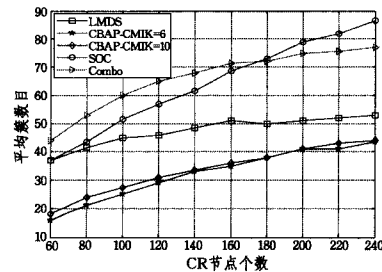


图 2 平均簇个数

图 3 给出了网络中平均链路可用信道数目的比较。由图可见,CBAP-CMI 算法获得的簇中,平均链路信道数随着网络中节点密度的增加而提高,比 LMDS 算法至少多 70%,在密

(下转第 66 页)

- [5] 王胜灵,侯义斌,黄建辉,等. PFWR: 能实现比例公平的增强型 WRR[J]. 计算机学报, 2008, 31(5)
- [6] 谢钧,俞璐,金凤林. 基于排队时延和丢包率的拥塞控制[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9)
- [7] Ren F Y, Huang X M, Lin C. Design of a Two-category Classifier with Multi-dimension for Active Queue Management[C]//First ACM SIGCOMM Asia Workshop. Beijing, China, April 2005: 150-157
- [8] 边肇祺,张学工,等. 模式识别(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2000: 87-90

- [9] Fei A, Pei G, Liu R, et al. Measurements on delay and hop-count of the internet[C]//IEEE GLOBECOM'98-Internet Mini-conference. Sydney, Australia, November 1998
- [10] Fujii K, Goto S. Correlation between hop count and packet transfer time[C]//APAN/IWS2000. February 2000: 15-17
- [11] UCN/LBL/VINT. Network Simulator-NS2 [EB/OL]. <http://www.mash.cs.berkeley.edu/ns>
- [12] Jain R, Chiu D M, Hawe W. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems[R]. DEC-TR-301, September 1984

(上接第 61 页)

度较大的网络中接近 Combo。参数 $K=10$ 时, 链路信道数目大于 $K=6$ 时的链路信道数目, 这是因为经过更多的循环, 簇结构更为优化。但前者的时间开销是后者的 1.57 倍。

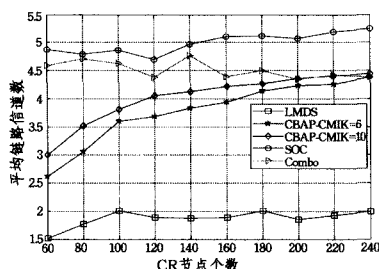


图 3 平均链路信道数

图 4 给出了网络中平均簇内公共信道数目的比较。由图可见, CBAP-CMI 算法获得的平均簇内公共信道数目大于 3, 接近以优化簇内公共信道数目为目标的 SOC 算法和 Combo 算法; LMDS 算法不能保证簇内有公共信道。此外, 增加消息交互次数可以缓慢增加簇内公共信道数。

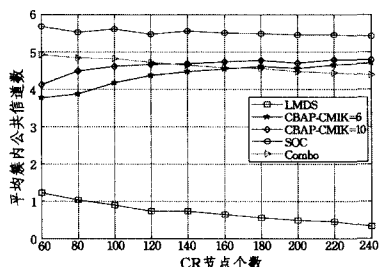


图 4 平均簇内公共信道数

综合上述仿真结果可知, CBAP-CMI 算法产生的簇数目更少, 获得的平均链路可用信道数目和簇内公共信道数目接近 Combo 等优化簇内公共信道的分簇算法。增加 CBAP-CMI 消息交互次数可以以较大的时间开销缓慢增加簇内公共信道数目和链路信道数目。

结束语 提出了一种基于 AP 算法模型的认知 Ad-hoc 网络分簇算法, 通过认知用户的分布式消息交互, 建立起相对稳定、高效的簇结构。仿真结果显示, 该算法减小了网络中的簇数目, 提高了簇内通信平均可用链路数目, 保证了簇内节点至少有一个公共信道, 减小了控制开销, 也提高了簇结构的稳健性, 为认知 Ad-hoc 网络中分布式频谱协作提供了高效的网络拓扑结构。

参考文献

- [1] Spectrum policy task force report [R]. 022135, Federal Communications Commission, Nov. 2002

- [2] Akyildiz I F, Lee W-Y. NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2006, 50: 2127-2159
- [3] XG Working Group. The XG Vision RFCs [SB/OL]. <http://www.ir.bbn.com/projects/xmac/rfc/rfc-vision.pdf>
- [4] End-to-End Reconfigurability. E2R_WP5_D5_3_050727 [RB/OL]. http://e2r.motlabs.com/Deliverable/E2R_WP5_D5_3_050727.pdf
- [5] Zhao Jun, Zheng Hai-tao, Yang Guang-hua. Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Allocation Networks[C]//IEEE DySPAN05. 2005: 259-268
- [6] Akyildiz I F, Lee W-Y, Chowdhury K R. CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks[J]. Ad-hoc Networks, 2009, 7(5): 810-836
- [7] Komali R S, Thomas R W, Dasilva L A, et al. The Price of Ignorance-distributed Topology Control in Cognitive Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4)
- [8] Ren W, Zhao Q, Swami A. On the Connectivity and Multihop Delay of Ad-hoc Cognitive Radio Networks[Z]. arXiv: 0912.4087v1
- [9] Yu J Y, Chong P H J. A survey of clustering scheme for mobile Ad-hoc networks[C]//IEEE Communications Surveys & Tutorials. First Quarter 2005
- [10] Zhang C T, Maggio H, Chlamtac G M, et al. Topology Management in CogMesh: A Cluster-based Cognitive Radio Mesh Network[C]//IEEE ICC2007 Proceedings. June 2007: 6516-6521
- [11] Lazos L, Liu Si-si, Krunz M. Spectrum opportunity-based control channel assignment in cognitive radio networks[C]//IEEE Secon2009 Proceedings. 2009
- [12] Asterjadhi A, Baldo N, Zorzi M. A cluster formation protocol for cognitive radio ad hoc networks[C]//2010 European, Wireless Conference(EW). 2010: 955-961
- [13] Baddour K E, Ureten O, Willink T J. Efficient clustering of cognitive radio networks using affinity propagation [C]//IEEE Crowncom2009 Proceedings. 2009
- [14] Frey B, Dueck D. Clustering by passing messages between data points[J]. Science, 2007, 315: 972-976
- [15] 许文竹, 徐立鸿. 基于仿射传播聚类的自适应关键帧提取[J]. 计算机科学, 2010, 37(1): 268-270
- [16] Sumedha M L, Weigt M. Clustering by soft-constraint affinity propagation: Applications to gene-expression data[J]. Bioinformatics, 2007, 23(20): 2708-2715
- [17] Krishnamurthy S, Thoppian M, Kuppa S, et al. Time-efficient distributed layer-2 auto-configuration for cognitive radio networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(4): 831-849
- [18] Arachchige C L, Venkatesan S, Mittal N. Asynchronous Neighbor Discovery Algorithm for Cognitive Radio Networks[R]. UTD-24-08, University of Texas at Dallas, August 2008