

基于 CSM 优先级的 CogWMN 联合路由与信道分配策略

章国安^{1,2} 丁晨莉¹ 包志华¹

(南通大学电子信息学院 南通 226019)¹ (东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)²

摘要 认知无线 Mesh 网络(CogWMN)中的节点可以自主切换通信频率。当节点寻找路由和分配信道时,容易出现信道分配的不均衡化。为了提高非授权频段的利用率,发挥多信道并行传输的优势,提出一种在没有全局控制信道条件下的基于信道统计度量(CSM)优先级的联合路由与信道分配策略,以解决信道分配不均衡化问题,使网络内节点能以较少的跳数接入 AP。仿真结果表明,所提策略能提高网络吞吐量和减少网络时延。

关键词 无线 Mesh 网络, 认知无线电, 多信道, 信道分配

中图分类号 TN92 **文献标识码** A

Joint Routing and Channel Assignment Strategy Based on CSM Priorities in CogWMN

ZHANG Guo-an^{1,2} DING Chen-li¹ BAO Zhi-hua¹

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)¹

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)²

Abstract Cognitive Wireless Mesh Networks (CogWMN) can change their communication frequency actively. When they look for routing and schedule channels, channel allocation seems unbalanced commonly. In order to increase the utility of unlicensed bands and the throughput with multichannel, a kind of joint routing and channel assignment strategy based on channel statics metric (CSM) with priorities without common control channel was proposed. This scheme may handle the unbalanced channel allocation problem and the mesh nodes in network can access AP in fewer hops. The simulation result shows that the proposed strategy can increase the throughput performance and reduce network time-delay.

Keywords Wireless mesh networks, Cognitive radio, Multi-channel, Channel allocation

1 引言

随着全球信息化的普及,频率资源短缺的问题日益紧张。而现行的频率资源分配模式是固定的,即授权用户也就是主用户(Primary Users, PUs)使用规定频段,非授权用户也就是次用户(Secondary Users, SUs)不得使用。因此,一旦授权用户暂停使用规定频段,整个频谱资源就被浪费。而认知无线电(Cognitive Radio, CR)为人们展示了频谱高效利用和各种无线设备共存的美好前景,受到学术界和产业界的竞相关注^[1]。

学术界和工业界已经提出了一些适用于认知无线电网络的网络体系结构,支持多信道、多接口的无线 Mesh 网络被列为其中^[2],形成了认知无线 Mesh 网络(Cognitive Wireless Mesh Network, CogWMN)。认知无线 Mesh 网络作为一种智能无线网络,能感知外部环境,根据当前环境状态做出智能决策来适应传输参数^[3]。譬如通过当地环境协调信息,决定路由以及信道分配。

CogWMN 通常采用异构分布结构方式,如图 1 所示。网络中主要有 3 种类型的节点,它们是 AP (Access Point) 节点、PUs 节点以及 MSUs (Mesh SUs) 节点。PUs 为首要用户,使用规定频段,而 MSUs 节点具有路由器功能,可多跳接入 AP。MSUs 配有认知无线电模块,可动态检测与共享频谱空穴。CogWMN 属于频谱检测接入(DSA)网络,大多数 DSA 系统采用全局公用信道 UCC(Universal Common Channel)来协调信道分配。文献[4]指出,利用认知无线电,通过全局公用信道发现路由与信道分配建立路由树的策略。但是频谱空穴是动态变化的,MSU 不会永远处于 UCC 上,也不会一直停留在固定的 Pc(Primary channel)上。MSU 需要协调控制信道的使用,将 UCC 应用在 CogWMN 并不适合。文献[5]对该问题进行了研究,提出了基于群集智能的认知无线 Mesh 网络,采用信道云的公共控制信道选择机制。本文在不需要额外加入控制信道的前提下,提出一种基于信道统计度量优先级的 CogWMN 联合路由与多信道分配策略,以解决信道分配不均衡化问题,提高非授权频段的利用率,发挥

到稿日期:2011-02-28 返修日期:2011-05-08 本文受国家自然科学基金(60872002, 50875132),江苏省高校自然科学基金项目(10KJB510021),东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(W200912),江苏省南通市应用研究计划项目(K2010015)资助。

章国安(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为无线通信网络、认知无线 Mesh 网络等, E-mail: gzhang@ntu.edu.cn; 丁晨莉(1985—),女,硕士,主要研究方向为认知无线 Mesh 网络; 包志华(1955—),男,教授,主要研究方向为认知无线电、超宽带通信技术。

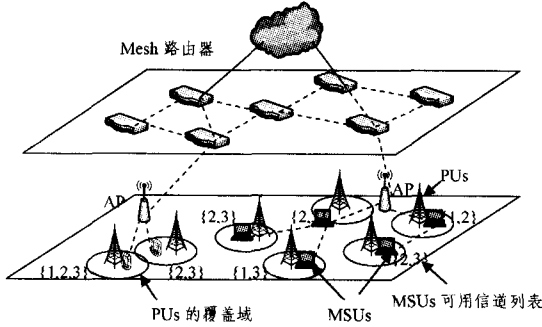


图1 CogWMN 结构

2 CogWMN 联合路由与信道分配策略

CR 在物理层检测到的频谱空穴与信道是两个概念。为了简化系统模型,假设一个频谱空穴对应一个信道,并且频谱空穴的频段固定。MSU 检测频谱空穴变化缓慢,并且除 AP 固定外,网络中终端移动缓慢,因而 CogWMN 可以看作是稳定的网络^[5]。

2.1 CogWMN 的 3 种状态机制

MSU 具有感知 Cogsta、发送 Sedsta 和控制 Colsta 3 种状态,如图 2 所示。网络拓扑结构会随着环境变化而发生变化,可用频谱的改变可以通过系统每个周期的 Cogsta 状态实现。MSU 处于 Cogsta 状态时感知频谱空穴,判断信道能否使用。随后进入 Colsta 状态,节点将获得的信息在每个可使用信道上广播。如果尚未建立拓扑信息,则首先进行路由树的初始化,然后通过实时的信息交互,网络中每个节点会更新数据库中的关于网络拓扑的信息。进入 Sedsta 后,一旦 PU 加入 Pc,MSU 就与 PU 发生冲突。为了保证 PU 的收发质量,MSU 必须退出正在使用的信道,抛弃数据包,转入 Colsta。MSU 还必须切换到空闲信道,通知接收方进入等待状态等操作。

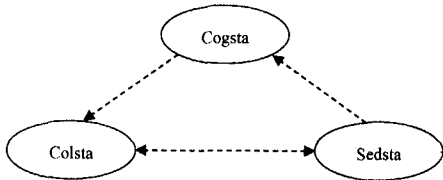


图2 MSU 3 种状态关系图

2.2 CogWMN 系统模型

CogWMN 的模型可以用无向图 $G=(V, E)$ 表示, V 表示 MSU 节点 V_i 与 AP 节点 U_j 的集合, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $j \in \{1, 2, \dots, S\}$, N 是 CogWMN 的 MSU 节点数, S 是 CogWMN 的 AP 节点数; E 表示不同 V_i 间连通及 U_j 连通的集合。

相关符号如表 1 所列。Plist 为 CogWMN 中一组全部 P_{c_m} 的集合, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, M 代表所有可用的信道数。由于频谱空穴的检测具有依赖于时间和地域的特征,因此每个 V_i 和 U_j 只能接入一部分信道 $Plist_{V_i}$ 和 $Plist_{U_j}$, 所以 $Plist_{V_i} \subseteq Plist$, $Plist_{U_j} \subseteq Plist$ 。MSU 具有频谱感知的能力,可以感知首要用户所占用的信道,而节点 V_i 可以在 $Clist_{V_i} = Plist_{V_i} - P_{V_i}$ 内任意信道上接收和发送数据。 V_i 与 $Clist_{V_i}$ 组合成 MSU 有效信道矩阵 $L_V = \{l_{i,m} | l_{i,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$, $l_{i,m} = 1$ 表示 P_{c_m} 对于节点 V_i 可用, $l_{i,m} = 0$ 表示 P_{c_m} 对于节点 V_i 不可用;节点 U_j 有效信道矩阵 $L_U = \{l_{j,m} | l_{j,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$ 。

表 1 系统模型所用符号

符号	描述
Plist	表示全部 P_{c_m} 的集合
$Plist_{V_i}$	表示 V_i 可接入部分的 P_{c_m} 集合
$Plist_{U_j}$	表示 U_j 可接入部分的 P_{c_m} 集合
P_{V_i}	表示 V_i 感知范围内首要用户占用的信道集合
P_{U_j}	表示 U_j 感知范围内首要用户占用的信道集合
$Clist_{V_i}$	表示 V_i 可用信道集合
$Clist_{U_j}$	表示 U_j 可用信道集合
L_V	表示 V_i 有效信道矩阵
L_U	表示 U_j 有效信道矩阵

如果 V_i 与 V_k 在互相的传输范围内, $Clist_{V_i} \cap Clist_{V_k}$ 称为 V_i 与 V_k 可用信道交集。若满足条件 $Clist_{V_i} \cap Clist_{V_k} \neq \phi$, 则 $(V_i, V_k) \in E$; 或者 V_i 与 U_j 在互相的传输范围内, 若满足条件 $Clist_{V_i} \cap Clist_{U_j} \neq \phi$, 则 $(V_i, U_j) \in E$; 若非邻居节点间通信,则需要通过多跳实现。

在对路由寻找的过程中,需要考虑信道数量的分配,避免出现个别信道分配过于集中,导致网络内节点竞争,占用信道传输业务流,而忽视了多信道并行传输的优势。因此 CogWMN 联合路由寻找与信道分配矩阵 CH_G 可描述为:

$$CH_G = \text{avg}_{m \in \{1, 2, \dots, M\}} \left\{ \sum_{(V_i, U_j) \in E} l_{i,m} \cdot l_{j,m} + \sum_{(V_i, V_k) \in E} l_{i,m} \cdot l_{k,m} \right\} \quad (1)$$

2.3 信道统计度量

为了避免出现个别信道分配过于集中的问题,即信道分配数量两极分化,设定信道统计度量(Channel Statics Metric, CSM)为统计参数,其中 $num(P_{c_m})$ 为信道 P_{c_m} 的分配次数, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

$$num(P_{c_m}) / \sum_{V_i, U_j \in \pi} (Clist_{V_i} + Clist_{U_j}) \leq \epsilon \quad (2)$$

式中, π 为已分配信道节点集合, ϵ 为度量阈值。当 $num(P_{c_m}) > 1$, 信道 P_{c_m} 配额小于阈值时,相应调整分配信道的优先级。

2.4 邻节点的发现

MSU 通过感知周期后,网络内节点获得了自身可用的信道列表。若发送节点与接收节点可用信道不止一个,则需要通过信道统计度量来选择信道。一帧时间被划分为 M 个相等间隔 T_m , 每个间隔对应一个信道,此间隔的时间足够给每个节点周期广播数据包。邻节点的发现过程如图 3 所示。为了避免网络节点因同时同一信道上广播数据包而造成包碰撞,致使数据包大量流失,节点随机选择自己的周期窗口 PW , 而在两个 PW 间为侦听窗口 LW , $LW \leq PW < T_m$ 。至 M 个间隔完成后,网络内节点掌握邻节点的信息,形成一跳邻节点列表 Nb 。

```

Input:  $L_V, L_U$ 
for ( $P_{c_1} < P_{c_m} < P_{c_M}$ )
clock.  $P_{c_m}$ 
 $V_i$  get  $PW_{V_i}$  and  $LW_{V_i}$ 
 $U_j$  get  $PW_{U_j}$  and  $LW_{U_j}$ 
    if ( $P_{c_m} \in Clist_{V_i} || P_{c_m} \in Clist_{U_j}$ )
        clock.  $PW \rightarrow$  Broadcast
        clock.  $LW \rightarrow$  Listening
    if ( $V_k || V_i$  receive packets from  $V_i || U_j$ )
         $Nb_{V_i}$ . Add( $V_k, Clist_{V_i}$ )
         $Nb_{U_j}$ . Add( $V_i, Clist_{V_i}$ )
    else Drop
end
end
end
    
```

图3 邻节点发现过程

2.5 基于信道统计度量优先级的初始路由树建立过程

CogWMN中各节点在完成频谱感知后,以信道统计度量优先级为标准,建立初始路由树。初始路由树框图如图4所示,相关符号见表2。

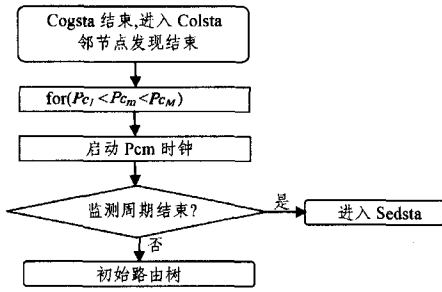


图4 初始路由树框图

表2 路由树初始化过程所用符号

符号	描述
$REQ(l_i, m l_j, m)$	表示 V_i 或 U_j 请求信道 P_{cm}
$ACK(l_k, m)$	表示节点 k 允许接入 P_{cm}
$REF(l_k, m)$	表示节点 k 拒绝接入 P_{cm}
$member(V_i U_j, \Delta)$	表示 V_i 或 U_j 的 Δ 跳成员
$REQ(l^*, m)$	表示缺省成员请求信道 P_{cm}
$PRI(P_{cm})$	表示升级 P_{cm} 优先级
$num(P_{cm})$	表示信道 P_{cm} 统计量

初始路由树建立过程如下:

(1) Cogsta 结束,进入 Colsta,发现邻节点,更新一跳邻节点列表以及邻节点可用信道列表。

(2) U_j 节点检查邻节点列表中是否存在 P_{cm} 的邻节点。

① 若存在,节点首先查询信道优先级。如果可用信道交集内有优先信道,则优先分配;若优先信道不止一个,则选取与 $\Delta-1$ 跳信道号最远的信道,减少业务流传输时邻信道的干扰。如果没有优先信道, U_j 对 CSM 值进行评估与排序,选择最小 CSM 值的信道或者在 CSM 值相等的情况下与 $\Delta-1$ 跳信道号最远的信道,随后 U_j 向单跳邻节点逐个发送请求信道信息 $REQ(l_i, m)$ 。收到请求信息的节点回复 $ACK(l_i, m)$ 或者拒绝信息 $REF(l_i, m)$ 。假使节点 V_i 回复允许接入信息,则 V_i 与 U_j 建立连接,构建路由树信息 $TR = (U_j, member(U_j, \Delta), P_{cm}, num(P_{cm}), PRI)$ 。随后检查分配信道 CSM 值是否小于阈值 ϵ 。如果没有,则继续寻找可接入节点,直至没有邻节点的可用信道包含 P_{cm} ;如果小于阈值,则将 P_{cm} 升级为优先分配信道 $PRI(P_{cm})$,同时在下一信道分配时优先分配该信道。假若 $PRI(P_{cm})$ 的 CSM 值恢复到阈值以上,则撤销相应的优先级。如果寻找可接入节点完毕后,CSM 值仍然小于 ϵ ,将信道升级为优先分配信道。之后 V_i 的分枝节点继续以信道统计度量优先级为标准寻找路由和分配信道。

② 若不存在,则 U_j 查看是否已经建立路由树信息。

如果已建立,则发送 $REQ(l^*, m)$ 给分枝节点,要求在 T_m 间隔内由分枝节点继续建立路由树过程。如果分枝节点的邻节点列表也未包含 P_{cm} 的邻节点,则将信道 P_{cm} 升级为优先分配信道 $PRI(P_{cm})$,并将此情况发送给 U_j 。如果尚未建立,则将信道 P_{cm} 升级为优先分配信道,等到间隔 T_m 结束后, U_j 切换到信道 P_{cm+1} 优先分配信道 P_{cm} ,其他节点再通过路由树建立过程,完成初始化。具体流程框图如图5所示。

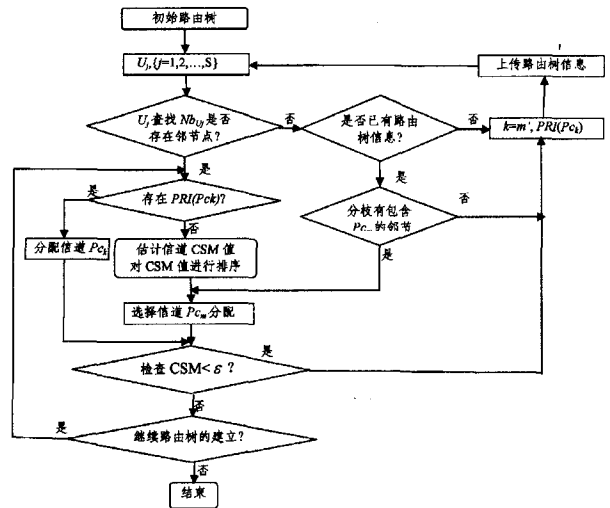


图5 路由树建立过程框图

(3)若监测周期未结束,则返回(2);监测周期结束,则路由初始化结束,进入 Sedsta。

3 节点的加入与退出

CogWMN 在有 MSU 节点加入时,由于节点未必清楚邻节点所在信道的位置,因此节点试图在可用信道中随机选择信道。设节点 V_n 需要接入网络,随机选择 Cl_{ist_v} 的某信道,广播自己的节点信息,等待邻节点回复状态信息。接着,节点 V_n 再随机选择另一个信道,广播节点信息,等待邻节点回复状态信息,直到轮完所有可用信道。节点 V_n 通过对跳数以及信道统计度量的大小进行排序,选择跳数最少的节点 V_x 作为父节点,切换至 V_x 所在信道;若跳数相同,则选择信道统计度量中分配偏少的信道。假使节点 V_x 同意开放信道,节点 V_n 将路由树信息更改,上传至 U_j 并由 U_j 将更新后的路由树信息发送给所有分枝。若不同意开放信道,则 V_n 继续寻找父节点。

CogWMN 中节点退出时会出现两种情况,第一种是分枝最末端节点退出网络,分枝最末端节点将退出请求信息告知父节点,父节点修改路由树信息,上传至 U_j 并由 U_j 将更新后的路由树信息发送给所有分枝。第二种情况较为复杂,节点既有分枝节点又有父节点。此时节点必须同时告知分枝节点和父节点,父节点和分枝节点都必须更新路由树信息,分枝节点根据邻节点列表和路由树信息,选择跳数最少的父节点,发送请求信道信息。

4 仿真结果与分析

本文使用的仿真工具为网络模拟器 NS2。认知无线 Mesh 网络的仿真情景为 4×4 的网格网络结构,网格内有 14 个 MSU 和 2 个 AP 以及 4 个 PU,均匀分布在 $1000m \times 1000m$ 的范围内。这里假设网格网络结构被划分为 4 个区域,每个区域的节点通过感知频谱空穴,选择可用信道作为自身的可用信道,并且可用信道至少有一个。给每个节点配 3 个射频, P_c 共有 14 个,节点各自的可用信道由它所在的子区域决定,每个节点在各自的子区域内感知可用信道。在仿真过程中,0~5s 内为感知过程,从 5s 以后记录网络的表现情况。Cog-

WMN内存在6条传输的业务流中,分别在随机 random、CSM阈值为0.04、CSM阈值为0.05、CSM阈值为0.06的参数下比较网络吞吐量和时延情况。

经过控制阶段的联合路由与信道分配过程,将所有的MSU接入AP。如图6所示,当CSM阈值为0.04、0.05以及0.06时,网络吞吐量比random情况下的网络吞吐量高,尤其是CSM阈值为0.05时吞吐量最大。这是由于信道分配均衡后发挥了多信道并行传输的优势。

图7是在不同参数下网络时延的比较图。在random情况下,网络时延比使用CSM阈值为0.05时要较大些,这是由信道分配不均衡引起的。CSM阈值为0.04的时延要比CSM阈值为0.05的网络时延大,因为阈值的不同使信道的分配均衡化不同。CSM阈值为0.05时更能解决信道不均衡化问题,同时并行业务流传输的时延弥补了协调信道分配带来的时延。而CSM阈值为0.06时的时延要比阈值为0.05更大些,这是由于阈值较大时,节点间信道分配的计算量增加从而增大了网络的时延。因此CSM阈值为0.05时是较优阈值,在此阈值下基于信道统计度量优先级的联合路由与信道分配策略能够增加网络多信道并行传输的能力,网络吞吐量比random情况增加了36.8%。

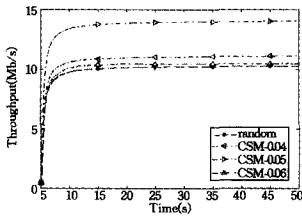


图6 可用信道不同的网络吞吐量的比较

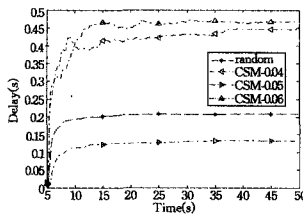


图7 可用信道不同的网络时延的比较

对于节点数量不同的网络场景下,可使用信道不同时,CSM较优阈值也会相应变化。图8(a)所示为14个MSU与23个MSU在可用信道数为14的条件下不同CSM阈值所对应的吞吐量对比。从图中可以看出,14个MSU时的较优CSM阈值为0.05,此时吞吐量最大。23个MSU时的较优CSM阈值为0.02,相比14个MSU时的较优阈值有减小的趋势。图8(b)为14个MSU与23个MSU在可用信道数为7的条件下网络吞吐量的比较。从图中看出14个MSU时的较优CSM阈值为0.06,而23个MSU时的较优CSM阈值为0.04。随着网络节点数量的增加,较优CSM阈值随之减小。因此,可用信道数量以及网络节点数量变化会影响CSM阈值较优值的取值。

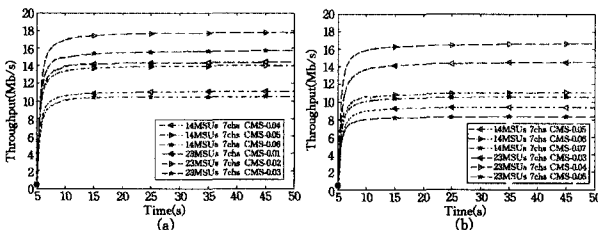


图8 节点与信道数量不同的吞吐量对比

结束语 本文针对认知无线电环境下的无线 Mesh 网络,提出了一种基于信道统计度量优先级的联合路由与信道分配策略。网络内各个节点根据信道统计度量优先级构建路由树,当信道 CSM 值小于阈值时,提高信道分配优先级。本策略可解决信道分配不均衡化问题,发挥多信道业务流并行传输的优势。针对认知无线 Mesh 网络拓扑结构发生变化,例如节点加入与退出,提出了相应的处理方案。仿真结果表明,基于信道统计度量优先级的联合路由与信道分配策略能够增加网络吞吐量和减少网络时延。随着网络场景中节点数和可用信道数的变化,通过调节 CSM 阈值,能够提高认知无线 Mesh 网络的性能。

参考文献

- [1] 刘玉涛,谭学治. 认知无线电及其组网技术[J]. 移动通信, 2008 (1):40-44
- [2] 朱江,李少谦. 认知无线网络构架与协议体系[J]. 中兴通讯技术, 2007,13(3):05-08
- [3] Thomas, DaSilva R W, Mackenzie L A, et al. Cognitive Networks[C]//DYSPAN. 2005:352-360
- [4] Agrawal C G, Dharma P. Channel Assignment with Route Discovery (CARD) Using Cognitive Radio in Multi-channel Multi-radio Wireless Mesh Networks[C]// IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks. 2006:36-41
- [5] Chen Tao, Zhang Hong-gang, Katz M D, et al. Swarm Intelligence-based Dynamic Control Channel Assignment in CogMesh [C]//International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems. 2008:294-299
- [6] Marina M K, Das S R. A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks[C]// BroadNets. 2005:412-421
- [7] Wang Qi-wei, Zheng Hai-tao. Route and Spectrum Selection in Dynamic Spectrum Networks[C]//IEEE CCNC. 2006:625-629
- [8] Chen Tao, Zhang Hong-gang, Maggio G M, et al. CogMesh: A Cluster-based Cognitive Radio Network[C]//DYSPAN. 2007: 168-178
- [9] Chowdhury K R, Akyildiz I F, et al. Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 168-181
- [10] Xin Qin, Zhang Yan, Xiang Jie. Optimal Spectrum Scheduling in Cognitive Wireless Mesh Networks [C]//International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. 2008: 724-728
- [11] Chen Tao, Zhang Hong-gang, Maggio G M, et al. Topology Management in CogMesh: A Cluster-based Cognitive Radio Mesh Network[C]//IEEE International Conference on Communications. 2007: 6516-6521
- [12] Thomas H Y, Shi Yi, Sherali H D. Spectrum Sharing for Multi-Hop Networking with Cognitive Radios [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 146-155