

## 认知无线网络路由及频谱分配联合策略研究

程 赓 李昀照 刘 威 程文青 杨宗凯  
(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘 要:** 认知无线网络中的节点可以自主切换通信频率, 从而对拓扑和路由产生影响。该文针对多跳认知无线网络的场景提出了一种路由与频谱分配的联合策略, 在按需路由的过程中完成频谱分配任务。实验结果表明, 在多个数据流并存的认知无线网络中, 该策略较其它路由方法具有更好的适应性和更低的累积时延。

**关键词:** 认知无线网络; 路由; 频谱分配; 调度

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0695-04

## Joint Routing and Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks

Cheng Geng Li Yun-zhao Liu Wei Cheng Wen-qing Yang Zong-kai

(Dept. of Electronics and Information Engineering,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Nodes in Cognitive radio networks can change their communication frequency actively, which affects networks topology and routing. In this paper, a joint routing and spectrum assignment scheme for cognitive radio networks is proposed that assigns spectrum bands during on-demand routing. Simulation results show that, in the scenario of cognitive radio networks that have multiple data flows, this scheme provides better adaptability and incurs much lower cumulative delay when comparing to other routing approaches.

**Key words:** Cognitive radio networks; Routing; Spectrum assignment; Scheduling

### 1 引言

随着无线和移动通信的迅速发展, 有限的开放频段已经无法满足不断增长的需求, 而研究表明现有专用频段中有相当一部分并未得到充分利用。认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术<sup>[1]</sup>的提出使非授权用户能够感知、识别及接入当前空闲的专用频段, 从而大幅提高频谱利用率。

认知无线网络中每个节点能够主动、动态地感知目前未被占用的频谱“空白区域”(white space), 形成“频谱机会集合”(Spectrum Opportunity, SOP)<sup>[2]</sup>, 并从中选取合适的频段工作, 从而有效地降低冲突、干扰, 提高通信效率。在这种网络中, 频谱分布不均匀, 各节点的SOP集合各不相同, 且动态变化, 寻找路由面临着许多挑战: 首先, 为了确定认知网络中下一跳节点以及与之通信的频段, 多跳认知网络的路由必须和频谱分配紧密结合在一起<sup>[3]</sup>; 其次, 认知网络中不能忽略切换频率的代价, 即切换时延。在20MHz~3GHz的频谱范围内, 收发器的工作频段每改变10MHz通常会带来10ms的时延<sup>[4]</sup>, 这同网络通信中常见的退避时延相比不能忽略。

现有认知无线网络路由策略主要分为两类, 一类是集

中式, 在掌握全局频谱分布信息的前提下计算最优信道分配和路由<sup>[5, 6]</sup>。其缺点是代价过大, 仅适用于具有基站等固定基础设施的认知单跳接入网络; 另一类是将按需式路由与频谱分配结合, 比如“避免切换”分配策略<sup>[7, 8]</sup>和“K跳独立”分配策略<sup>[3, 9]</sup>, 都是在发送数据的时候开始边寻路并分配信道, 避免了频繁更新全局信息。这类方法不能满足节点SOP集合动态变化的特点; 所提出的路由度量指标忽略了多种时延对选路的影响<sup>[10, 11]</sup>, 因此不适用于频谱分布不规则、存在频段切换的认知无线网络。

本文提出了面向多跳认知网络的按需路由与频谱分配联合策略, 结合按需路由的基本流程, 实现了节点SOP频谱集合信息的交换, 完成频谱分配的任务; 以时延作为路由的衡量标准, 推导了相关的计算公式; 针对交叉数据流的场景采取特殊的频谱切换策略, 降低累积时延。

### 2 联合策略设计

#### 2.1 问题分析与场景描述

在多跳认知网络中, 频谱分布不均匀, 各节点会自主感知可用频段, 因此需要获取节点间 SOP 集合的分布和相互关系。另一方面, 对于多跳认知网络中多数据流工作场景, 数据流交叉节点必须在不同频段间来回切换来为各数据流服务。本文基于按需路由协议 AODV<sup>[12]</sup>建立了一种在多跳认知网络中的节点 SOP 集合信息交互机制, 并在节点上应用

2007-01-11 收到, 2007-09-30 改回

国家自然科学基金(60572049, 60602029)和湖北省智能互联网技术重点实验室开放基金(HSIT 200605)资助课题

频段分配策略,称为“联合频谱分配的按需路由协议”(Joint Spectrum assignment On-demand Routing Protocol, JSORP)。

为了保证认知节点能够收到协议控制信息,本文假设认知节点都另配一个传统无线通信接口<sup>[8]</sup>。一方面,认知无线电收发器能动态调整工作频段,传输数据;另一方面,节点通过传统无线通信接口形成统一的共享控制信道,传递协议报文。同时,本文假定节点的网络层路由协议能够及时获知该节点 SOP 集合信息<sup>[13, 14]</sup>;假设经过交叉节点的数据流具有相同优先级,交叉节点依次为它们服务;假设工作在相同频段的冲突节点按照 IEEE 802.11 协议标准<sup>[15]</sup>进行退避。

## 2.2 按需路由

本文提出的路由策略沿用 AODV 的基本流程,当且仅当有数据要发送且没有有效路由的时候,认知节点按需启动路由发现过程,在控制信道上广播路由请求(RREQ)报文。目的节点收到 RREQ 以后会发回路由回应(RREP)。RREQ 和 RREP 消息分别携带了源节点端和目的节点端的频谱信息,它们结合在一起能够提供一条路径上完整的频谱使用信息。

本文提出的认知网络按需路由的主要过程如下:

在路由发现阶段,源节点将自身的 SOP 集合信息通过 RREQ 广播出去;转发节点也将自己的 SOP 集合加入 RREQ 中的“SOP 集合链表”。收到 RREQ 的节点比较 SOP 集合链表中最近集合与自己的 SOP 集合,当且仅当存在交集时才继续转发 RREQ。这样能确保 RREQ 沿着空间和频谱切换上都可行的路径到达目的节点。

在路由回应阶段,目的节点根据收到的 RREQ 中沿途节点的 SOP 集合分布情况率先分配频段,然后将所选频段封装在 RREP 消息中发往源节点。中间节点从接收到的 RREP 消息中提取各下游节点已分配的频段,连同先前从 RREQ 报文中提取的上游节点 SOP 集合分布,就能计算出目前最适合的工作频段,同时更新路由表,最后生成新的 RREP 继续回送到源节点。

上述路由方式能够使节点都准确知道下一跳节点的工作频段,从而快速找到空间距离较短且能通过适当频段切换建立通信的多跳路径。

## 2.3 路由策略度量标准

本文以端到端路径的累积时延作为衡量多跳路径优劣的标准。在多跳认知网络中,产生时延的主要原因是频段切换和同频退避。一条多跳路径切换频段的次数就越多,“切换时延”就越大;反之则会导致使用相同频段的节点数增加,也加剧了同频段内节点间的干扰和冲突(隐蔽终端/暴露终端问题),从而导致“退避时延”<sup>[15]</sup>。

另外,计算端到端累积时延还需考虑多数据流交叉带来的影响,因为交叉节点的频段切换顺序选择不当会带来额外的切换时延和退避时延。本文用形如{源端频段,目的端频段}

的二元组来描述经过交叉节点的数据流,将所有二元组中的频段称为活跃频段,它们的并集称为该节点的活跃频段集合。本文提出在交叉节点按活跃频段轮询的切换机制,在各数据流优先级相同的前提下,交叉节点在一个轮询周期内只在某活跃频段工作一次,处理和该频段相关的所有数据收发任务,从而有效降低节点在同一个频段反复切换带来的时延。例如图 1 左边交叉节点  $I$  将按照右边的频段切换顺序依次处理频段  $A, B, C$  上数据流的收发。

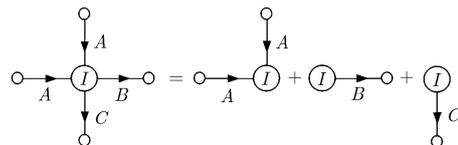


图1 节点按活跃频段轮询

根据以上讨论,端到端累积时延包括交叉节点上的时延(记为  $DN$ ),以及当前路径造成的时延(记为  $DP$ )。前者取决于所经过的数据流个数及其频段切换要求;后者取决于路径跳数以及节点各自的工作频段。

**2.3.1 节点时延  $DN$  分析** 本文用  $D_{switching}$  和  $D_{backoff}$  分别表示交叉节点上由频段切换和同频段内多数据流干扰退避造成的时延,则节点  $i$  上的总时延  $DN_i$  可表示为  $DN_i = D_{switching} + D_{backoff}$ 。

如果交叉节点上有  $N$  个数据流,记为  $flow_n = \{src_n, dest_n\} (0 \leq n \leq N)$ ,则该节点对应二元组中导出  $M$  个活跃频段(记为  $Band_i (1 \leq i \leq M)$ )以及活跃频段集合  $S$ 。不妨设  $Band_i S (1 \leq i \leq M)$ ,且  $Band_i \leq Band_{i+1}$ 。通常在 20MHz~3GHz 的频谱范围内,收发器的工作频段每改变 10MHz 需要 10ms 的调节时间<sup>[4]</sup>,于是本文假定从频段  $i$  切换到频段  $j$  的时延  $D_{i,j}$  为  $D_{i,j} = k |Band_i - Band_j|$ ,式中  $k$  为比例系数,依文献[4]定为 10ms/10MHz。本策略中切换时延为

$$D_{switching} = 2D_{M,1} = 2k \cdot |Band_M - Band_1| \quad (1)$$

设从  $flow_n = \{src_n, dest_n\}$  的二元组中提取每个活跃频段  $Band_i$  上冲突节点的个数  $Num_i$ ,并用  $p_c$  表示节点的冲突概率,  $W_0$  表示 IEEE 802.11 指数退避流程中退避窗口的最小值<sup>[15]</sup>,则  $Band_i$  上的退避时延<sup>[16]</sup>为

$$D_{backoff}(Num_i) = \frac{1}{(1-p_c) \left( 1 - (1-p_c)^{\frac{1}{Num_i-1}} \right)} W_0 \quad (2)$$

根据式(1),式(2)可知,交叉节点为数据流分配新的频段,会增大活跃频段数  $M$  和切换时延  $D_{switching}$ ;分配已有频段  $Band_i$ ,则会增加该频段竞争节点个数  $Num_i$  和退避时延  $D_{backoff}$ 。

**2.3.2 路径时延  $DP$  分析** 路径上的节点  $i$  能够通过 RREP 报文获知它到目的节点间所有节点的频段选择。假设有  $h_X$  个相邻的节点都选择了相同的频段  $X$ ,且节点  $i$  距离目的节

点还有  $H$  跳, 则节点  $i$  的路径时延  $DP_i = D_{\text{switching},i} + D_{\text{backoff},i}$ 。其中切换时延

$$D_{\text{switching},i} = \sum_{j=i}^H k |\text{Band}_j - \text{Band}_{j+1}| \quad (3)$$

$D_{\text{backoff},i}$  为节点  $i$  到目的节点所形成的多跳准链状拓扑的退避时延。根据“非竞争等效带宽”<sup>[17]</sup>的推导, 用  $p_o$  表示节点观察到频段可用的概率;  $p_c$  表示节点  $P$  观察到某个频段可用同时  $Q$  也观察到这个频段可用的概率;  $q_c$  表示在  $Q$  没有观察到频段可用而  $P$  观察到频段可用的概率, 则有

$$D_{\text{backoff},i} = \frac{S_{\text{DATA}}}{\text{BW}} \left( \frac{\left\lfloor \frac{h_X + 1}{2} \right\rfloor - U(h_X)}{U(h_X)} \right) \quad (4)$$

式中  $S_{\text{DATA}}$  是数据包的大小,  $\text{BW}$  是在当前频段下的带宽, 且

$$U(h_X) = \begin{cases} \sum_{j \text{ 为偶数}}^{h_X} \left( (1 - p_o) q_c \frac{1 - p_c^j}{1 - p_c^{j/2}} \right) \\ \sum_{j \text{ 为奇数}}^{h_X} \left( (1 - p_o) q_c \frac{1 - p_c^j}{1 - p_c^{j/2}} + p_o p_c^{j-1} \right) \end{cases} \quad (5)$$

基于以上对两种时延的分析可知, 交叉节点时延因节点而异, 可以依次添加到累积时延里, 再结合路径时延共同得到累积时延:

$$D_{\text{route},i} = DP_i + \sum_i^H DN_i \quad (6)$$

节点  $i$  就以最小化累积时延  $D_{\text{route},i}$  为目标给当前路径分配频段。

### 3 实验结果和性能分析

#### 3.1 仿真环境描述

本文采用 GloMoSim 仿真环境, 在一个  $1800\text{m} \times 1800\text{m}$  的区域内随机投放 60 个认知节点; 共享控制信道(2.4GHz 频段)的传输距离设置为 372.214m; 在 20MHz~2.4GHz 的频谱范围内为每个节点随机选取 2~8 个频段构成 SOP 集合来模拟频谱分布的非均匀性。

实验中引入两种典型策略进行对比: 一种降低了频段切换次数和切换频繁程度<sup>[7, 8]</sup>, 另一种为  $K$  跳以内节点分配独立频段以减少冲突退避<sup>[3, 9]</sup>, 分别称为“避免切换”策略和“ $K$  跳独立”策略。

#### 3.2 对变化的频谱分布的适应性

为了比较 3 种策略在变化的频谱分布中的适应性以及传输性能, 本文定义了“频谱分布稀疏性”(Sparsity of Spectrum Distribution, SSD)的度量标准, 用来描述节点 SOP 集合中频段分布的稀疏程度, 用 SOP 集合内相邻频段之差的均值来表示。SSD 越大预示着对应切换时延越大。实验考察不同路由策略随着 SSD 增加所得到的路径累积时延的变化情况, 如图 2 所示。

“避免切换”策略尽可能避免频段切换, 因而累计时延随 SSD 变化不大, 保持稳定在一定范围内; “ $K$  跳独立”策略在信道间尽量切换, 当 SSD 超过 500MHz 后, 累积时延明显增大, 原因是切换时延明显增加。而本文提出的 JSORP 策略联合考虑了同频段退避时延和频段间切换时延, 因此累积时延相比低很多。另外, 当 SSD 很小的时候, SOP 集合内频段差距不大, 这时近似为单信道通信, 3 种策略的累积时延基本相当。

#### 3.3 多数据流交叉场景仿真

通过改变与当前路径相交数据流的数目来评估 3 种策略对交叉数据流场景的适应程度, 结果如图 3。在交叉数据流数目不断增多的情况下, “避免切换”策略会产生越来越大的退避时延; “ $K$  跳独立”分配策略为一条路径使用了多个频段, 且相邻节点都使用不同频段, 大大增加了累计时延。但随着交叉数据流数目变多, 该策略的时延略低于“避免切换”策略, 因为多跳路径包含多个频段, 能够在一定程度上并行传输。

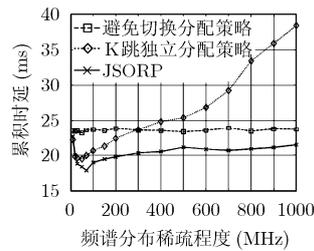


图 2 不同频谱分布稀疏程度下的累积时延

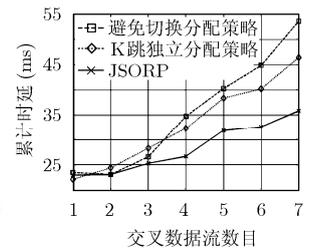


图 3 交叉数据流场景的累积时延

本文提出的 JSORP 策略对交叉节点上的多数据流频段切换进行了充分的建模与分析, 既考虑了路径时延, 也考虑了交叉节点的时延, 由每一跳节点自行调度, 而得到全路最优的累积时延。JSORP 得到的累积时延随交叉数据流数目变化的趋势比另两种策略都要平滑很多。

### 4 结束语

本文提出了多跳认知网络中基于累积时延的按需路由和频段分配联合策略, 解决了认知节点可用频谱资源分布不均匀和多数据流交叉对多跳路由和频段选择带来的困难, 使得路径具有最低的累积时延。实验表明, 该策略在频谱分布多变和多数据流交叉的环境下体现出更好的传输性能。

### 参考文献

- [1] Mitola Joseph. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. [Thesis (PhD)], Dept. of Teleinformatics. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [2] Xin Chunsheng, Xie Bo, and Shen Chien-Chung. A novel

- layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks. In Proc. IEEE DySPAN'05, Baltimore, USA, November, 2005: 308-317.
- [3] Gong Michelle X, Midkiff Scott F, and Mao Shiwen. Design principles for distributed channel assignment in wireless Ad hoc networks. in Proc. IEEE ICC, Seoul, 2005: 3401-3406.
- [4] TCI 8067 Spectrum Processor Data Specification, Webpage: <http://www.tcibr.com/PDFs/8067webs.pdf>, 2000.
- [5] Kyasanur Pradeep and Vaidya Nitin H. Protocol design challenges for multi-hop dynamic spectrum access networks. In Proc. IEEE DySPAN'05, Baltimore, November 2005: 645-648.
- [6] Alicherry Mansoor, Bhatia Randeep, and Li Li. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In Proc. ACM Mobicom'05, Cologne, Germany, 2005, 3: 58-72.
- [7] So Junming and Vaidya Nitin H. A routing protocol for utilizing multiple channels in multi-Hop wireless networks with a single transceiver. UIUC Technical Report, 2004.
- [8] Krishnamurthy S, Thoppian M, Venkatesan S, and Prakash R. Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks. In Proc. IEEE MILCOM'05, Atlantic City, USA, 2005: 455-460.
- [9] Gong Michelle X and Midkiff Scott F. Distributed channel assignment protocols: A cross-layer approach. In Proc. IEEE WCNC'05, New Orleans, USA, 2005: 2195-2200.
- [10] Kyasanur Pradeep and Vaidya Nitin H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface Ad hoc wireless networks. In Proc. ACM Sigmobile, 2006, 10: 31-43.
- [11] Draves R, Padhye J, and Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In Proc. ACM Mobicom'04, Philadelphia, USA, 2004: 114-128.
- [12] Perkins C E and Royer E M. Ad hoc on-demand distance vector routing. In Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA'99), New Orleans, USA, 1999: 90-100.
- [13] DARPA XG WG. The XG Architectural Framework V1.0. 2003.
- [14] DARPA XG WG. The XG Vision RFC V1.0. 2003.
- [15] IEEE Standard for wireless LAN-medium access control and physical layer specification, P802.11, 1999.
- [16] Kwak Byung-Jae, Song Nah-Oak, and Miller Leonard E. Performance analysis of exponential backoff. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005, 13(2): 343-355.
- [17] Liu Xin and Wang Wei. On the characteristics of spectrum-agile communication networks. In Proc. IEEE DySPAN'05, Baltimore, USA, 2005: 214-223.
- 程 赓: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为认知无线网络的调度与路由.
- 李昀照: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为认知无线网络的频谱共享技术.
- 刘 威: 男, 1977 年生, 副教授, 主要研究方向为认知网络技术、网络服务质量.
- 程文青: 女, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线网络与宽带网络.
- 杨宗凯: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为高速通信网络理论、远程教育等.