

# 认知无线网络路由研究综述

滑 楠<sup>1,2</sup>, 曹志刚<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

**摘 要:** 在对近期认知无线网络路由研究成果进行研究的基础上, 从邻居节点发现、“耳聋”、邻居节点消失、路由发现和跨层设计等5个方面, 对认知无线网络路由研究面临的重要挑战进行了分析; 从研究方法的角度, 对路由研究中对公共控制信道的依赖、路径延时, 以及需要考虑的技术指标进行了讨论. 最后, 从介质、信道、节点和网络等4个方面, 对路由研究场景设计进行了归纳总结; 并从路由优化方案和路由拓扑算法协议两个方面, 对主要研究成果进行了分析和讨论.

**关键词:** 认知无线电; 网络; 路由; 综述

**中图分类号:** TN915      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 04-0910-09

## Routing of Cognitive Radio Networks: A Survey

HUA Nan<sup>1,2</sup>, CAO Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. *The Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *The Telecommunication Engineering Institute of the Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China*)

**Abstract:** Based on the analyses of the recent routing research productions of the cognitive radio networks (CRN), this paper identifies five critical challenges on the routing research of CRN: neighbor discovery, deafness problem, neighbor disappearance, routing problem and cross-layer design, then some topics about common control channel, path delay and the technical metrics are discussed from the view of research method, which must be considered on the routing research of CRN. After that, we summarize and analyze the scenario design patterns of routing research from four aspects: medium, channel, node and network; study and discuss the main research productions from the views of optimization scheme and routing topology algorithm/protocol in detail at the end of this paper.

**Key words:** cognitive radio; network; routing; survey

### 1 引言

认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 的概念由 Joseph Mitola III 于 1999 年首先提出<sup>[1,2]</sup>, 并在其博士论文中对此进行了进一步的阐述<sup>[3]</sup>. 根据美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 的定义, 认知无线电被描述为能够基于同所在环境的交互而动态改变发信机参数的无线电<sup>[4]</sup>. 随着无线通信产业的迅速发展, 有限的频谱资源同不断增长的无线应用需求之间的矛盾越来越突出. 与此同时, 在已分配给合法用户的频段中, 从时间和空间角度来看, 又存在着频段利用率不均一的问题<sup>[5,6]</sup>. 在此前提下, FCC 提出了新的频谱管理和分配策略<sup>[7,8]</sup>, 全新的、优化使用频谱的无线通信模式变得十分重要, 动态频谱接入 (Dynamic Spectrum Access, DSA) 技术受到了广泛地重视. 认知无线电技术被

认为是实现 DSA 的重要技术手段, 扮演着非常重要的角色<sup>[8]</sup>.

随着认知无线电研究的逐步深入, 人们对基于认知无线电这一技术平台的终端组网问题也越来越重视. 在这一研究过程中, 不同文献对网络有不同的表述, 包括认知无线网络 (Cognitive Radio Networks, CRN)<sup>[8-16]</sup>、认知网络 (Cognitive Networks)<sup>[17,18]</sup>、认知无线网络 (Cognitive Wireless Networks)<sup>[19,20]</sup> 和认知无线 Ad hoc 网络 (Cognitive Wireless Ad hoc Networks)<sup>[21]</sup> 等. 此外还有动态频谱接入网络 (Dynamic Spectrum Networks)、次用户网络 (Secondary Networks) 和非授权网络 (Unlicensed Networks) 等称呼<sup>[11]</sup>. 为了研究的方便, 我们将上述由认知无线电终端组成的网络, 统称为认知无线网络.

路由研究是认知无线网络研究的一个重要方面, 相关研究工作才刚刚开始. 由于频谱动态接入带来的节

点可用信道随时间和空间变化的特性,使得认知无线网络路由问题呈现出不同于传统网络的特质,在研究方法上也有重要的区别.论文总结了当前认知无线网络路由研究的主要成果,对研究中需要注意的若干问题进行了讨论,对若干规律性问题进行了归纳和总结.在第 2 章中从 5 个方面对认知无线网络路由研究面临的重要挑战进行了分析.在第 3 章中从研究方法的角度,对路由研究中需要关注的若干重要问题进行了讨论.在第 4 章中,对主要路由研究场景设计进行了归纳总结,并从路由优化方案和路由拓扑算法协议两个方面,对主要研究成果进行了分析和探讨.最后,在第 5 章中对全文进行了总结,并对未来研究做了展望.

## 2 认知无线网络路由研究的重要挑战

认知无线网络路由研究面临许多重要挑战.下面我们从邻居节点发现、“耳聋”、邻居节点消失、路由发现和跨层设计等 5 个方面,对此进行分析和讨论.

### 2.1 邻居节点发现问题

邻居节点发现问题<sup>[21,22]</sup>由于邻近节点间缺乏协调控制机制引起.对于具有多个无线信道多种无线接口的认知无线网络节点来说,达成通信的前提,一是通信双方处于通信半径中,二是需要使用相同的接口和信道,如图 1 所示.如果节点使用当前信道和接口的组合(我们称为一个无线系统(Wireless System, WS))无法同邻居节点进行通信,那么节点会重新选择接口和信道组成新的无线系统,继续尝试同邻居节点通信.由于

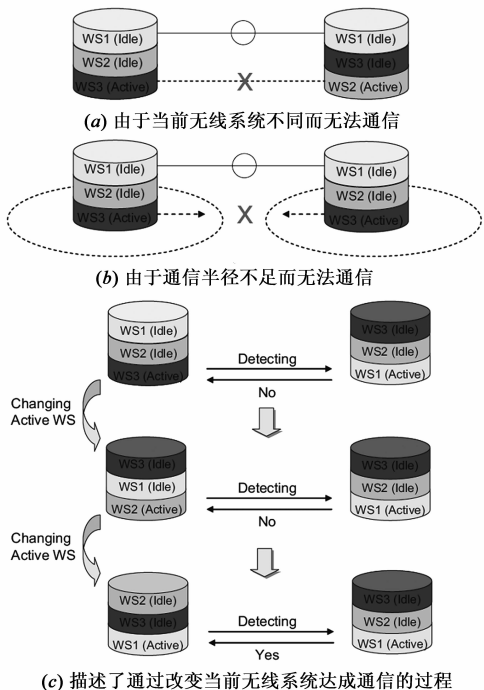


图1 邻居节点发现问题<sup>[21]</sup>

这种接口和信道的选择对于通信双方来讲是完全透明的,在缺乏协调机制的情况下,通信双方要达成一致可能需要一个很长的时间过程,甚至根本无法达成一致.

### 2.2 “耳聋”问题

“耳聋”问题(Deafness Problem)<sup>[23,24]</sup>由交换节点的信道切换引起,如图 2 所示.节点 B 为交换节点,节点 A 和节点 D 分别通过节点 B 向节点 C 和节点 E 发送数据包,图 2 中节点标识后的数字表示节点当前工作信道.当节点 B 收到节点 A 发送的数据包后,切换到信道 3 以转发数据包给节点 C.在节点 B 切换回信道 2 之前,如果节点 D 在信道 2 向节点 B 发送了数据包,那么由于此时节点 B 工作在信道 3 而无法接收,从而造成数据包丢失.除了当交换节点转发数据包时可能发生信道切换外,当节点可用信道集发生改变时(例如由于频谱空洞发生变化,或主用户出现),也会发生信道切换从而引发“耳聋”问题.

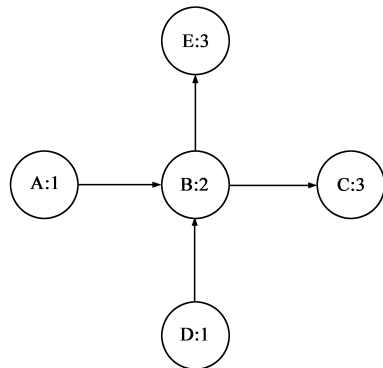


图2 “耳聋”问题<sup>[23]</sup>

### 2.3 邻居节点消失问题

邻居节点消失问题由于临近节点通信中断导致.在路由建立过程中和建立后,邻居节点消失将引起路由的重构.引起邻居节点消失的原因很多:一是由于“耳聋”问题引起.当信道切换时,通信可能中断.二是同节点的通信半径有关.当相邻节点的任意一方移动到通信半径之外时,也可引起通信中断.三是由于节点的死亡引起.对于第一种情况而言,通过适当的信道分配和重构机制可以使节点恢复通信,我们称为软消失问题.发生软消失问题时,应当避免不必要的路由重构.在文献<sup>[13]</sup>中指出,如何识别邻居节点以及如何互相通信,是路由问题对 MAC 层的重要挑战.

### 2.4 路由发现问题

路由发现问题<sup>[21,25]</sup>由于邻居节点发现问题引起,如图 3 所示.节点在没有中心控制机制的情况下,通过自主选择信道和接口构建 WS 进行通信,由于通信半径不够或者通信双方活动的 WS 不匹配,可能造成大量孤立节点的存在.此外,由于节点可用信道集的动态变化造成链路的断续连通,从而使在某一时刻连通的路由,很可能在下一时刻即由于底层链路的的中断而导致失效.因此,在路由协议的解析评价、网络的形式化描述、网络拓扑模型和网络连通性模型的建立上,应当充分

考虑信道和链路的时变因素,合理建立和选择路由,在尽量减少孤立节点的同时,尽可能地保证网络拓扑的稳定,避免拓扑的剧烈变化。

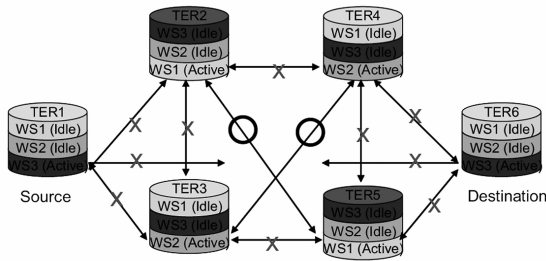


图3 路由发现问题(图中画叉的路径表示在现有WS组合下无法连通的路径)<sup>[21]</sup>

## 2.5 跨层设计问题

跨层设计方法<sup>[26~28]</sup>自提出以来受到了广泛重视,文献[29~31]等对其在认知无线网络中的应用进行了尝试.文献[32,33]的研究表明,在路由设计中,使用跨层设计方法结合考虑路由选择和频谱选择,同二者解耦研究相比,会有更好的性能表现.但是,由于跨层设计打破了系统原有的层次结构,必然会带来系统通用性和移植性差,不利于更新和维护等问题.此外,目前许多跨层设计方法过多的关注于某些特定层的优化,而不是着眼于整个系统层面或连接性能方面<sup>[34]</sup>.在这个意义上讲,跨层设计更适合于系统的某一单一层次,而不是整个网络<sup>[17]</sup>.

## 3 认知无线网络路由问题研究方法

由于认知无线网络的特殊性,其在路由研究方法上也表现出与众不同的特质.下面我们从研究方法的角度,对公共控制信道、路径延时和研究中需要考虑的技术指标进行分析讨论.

### 3.1 公共控制信道

在传统的 Ad hoc 网络中,通常维护有一个可靠的全局公共控制信道(Common Control Channel)用于传输控制信息,这为路由的建立和维护提供了非常便利的条件.但在认知无线网络中,由于频谱空洞的动态变化,节点可用信道是时变的,且随空间位置的不同而不同,要在网络范围内建立并维护一个公共控制信道是非常困难的.即使能够建立,受可用信道动态变化特性的影响,信道频繁切换和不同节点间信道的同步带来的开销也非常大,很难保证控制信息的可靠传输.因此,在认知无线网络中,依靠频谱动态接入方法提供全局公共控制信道面临巨大的挑战<sup>[13]</sup>.

那么如何解决路由建立和维护过程中控制信息的传输问题呢?根据对现有文献的分析,解决方案主要有以下3种:

(1) 依靠成熟技术建立公共控制信道

这是目前大多数研究的做法.文献[35,36]对 UWB 低速、低开销系统进行了研究,在研究中假设公共控制信道建立在 IEEE 802.15.4a 基础之上.文献[13]在研究中假设每个节点都装备有一个同认知无线电终端独立的 IEEE 802.11a 无线网卡,通过其实现公共控制信道的功能.文献[21]提出了 CLCR(Common Link Control Radio)的概念,通过 CLCR 实现公共控制信道.CLCR 是一个在各个节点都装备且实现相同的无线通信系统,并且覆盖范围尽可能的大,用于邻居节点发现和路由信息的交换.

(2) 建立局部控制信道

文献[37~39]提出了一种基于簇的路由协议,其中并不实现全网络范围的公共控制信道,而是在邻近节点间建立局部控制信道,从而大大降低了实现的难度和开销.局部控制信道依赖认知无线电终端建立,在节点多个可用信道中,选择一个信道作为主控制信道(即局部控制信道),通过主控制信道完成簇的形成和维护,以及同邻近簇及其成员的协商工作.基于 TDMA 的 MAC 协议广播簇及其成员信息,保证了通过局部控制信道可以有效地完成全局范围内控制信息的传递和交换工作.

(3) 开发不依赖控制信道的路由协议

文献[23]提出了一种不依赖公共控制信道的路由协议,建立路由所需的控制信息在节点当前所有可用信道上广播.这种方法虽然可以避免公共控制信道的使用,但是执行效率和时效性是需要认真面对的问题.

除了上面提到的三种方法外,很多文献在研究中直接假设公共控制信道成立,如文献[15]和[16]等,并未指出其实现的方法.由于这些文献研究的重点并不在公共控制信道上,因此我们认为文献做这样的假设和处理,在理论研究上是合理、可行的.

### 3.2 路径延时

由于认知无线网络不可避免地遇到多信道的切换问题,因此路径延时成为路由协议设计和路由优化时的一个重要指标.在文献[15,16]中指出,从第  $m$  个节点到目的节点的路径累积延时  $D_{\text{rout},m}$  为:

$$D_{\text{rout},m} = DP_m + DN_m = DP_m + \sum_m^H D_{\text{node}} \quad (1)$$

其中,  $DP_m$  为从第  $m$  个节点到目的节点的路径延迟,  $DN_m$  为从第  $m$  个节点到目的节点的数据流传输延迟之和,  $D_{\text{node}}$  为节点上数据流传输延迟,  $H$  为路径跳数.

$$DP_m = D_{\text{switching},m} + D_{\text{backoff},m} \quad (2)$$

其中,  $D_{\text{switching},m}$  和  $D_{\text{backoff},m}$  分别表示第  $m$  个节点到目的节点的路径信道切换延迟和信道竞争延迟之和.

$$D_{\text{node}} = D_{\text{switching}} + D_{\text{queuing}} + D_{\text{backoff}} \quad (3)$$

其中,  $D_{switching}$  表示节点上信道切换带来的延迟,  $D_{queueing}$  表示节点上数据流传输队列延迟,  $D_{backoff}$  表示节点间多节点竞争同一信道带来的延迟.

在文献[23]中, 作者将节点信道切换带来的延迟细分成了 2 个部分, 即  $D_{proto}$  和  $D_{hard-switch}$ . 前者是协议切换延迟, 表示节点切换信道时, 为了向其他节点表明信道切换而发送必要的控制信息和协议信息所产生的延迟. 后者是硬件切换延迟, 表示节点切换信道时, 为产生输出频率, 电路所必须的调整时间.

### 3.3 技术指标

在认知无线网络路由设计和验证中, 需要考虑的技术指标除了传统的延时、延时抖动、带宽和丢包率等外, 还需要对一些技术指标进行综合考虑.

#### (1) 同步开销

同步开销包括两方面, 一是节点时间同步带来的开销, 二是控制层面同步带来的开销. 由于认知无线网络信道动态变化, 也就是说, 我们不能假定任何一个信道在网络生存期内是可靠的, 因此开发适合动态信道环境的节点时间同步算法是我们需要认真研究的问题. 除此以外, 在控制层面, 例如路由建立过程中的邻居节点发现和路由发现过程, 不同节点必须通过控制信息保持控制层面动作的严格统一, 这在动态变化的信道下, 也是一个巨大的挑战. 保持同步带来的开销不容忽视.

#### (2) 能耗

虽然认知无线网络对于能量有效性的要求并不如其他一些网络(如无线传感器网络)那么严格, 但是在某些情况下能耗也是制约网络性能发挥的一个重要前提. 例如对于以 Ad hoc 方式布署的军用认知无线网络来说, 由于节点使用电池供电并在战斗条件下很难补充电源, 在这种情况下, 认知无线网络的能耗也是我们需要关心的核心技术指标之一. 在路由建立过程中, 虽然能耗主要由收、发信机工作引起, 但是路由算法的能量有效性也是一个不容忽视的问题.

#### (3) 多用户干扰

在文献[35]中指出, 为了达到网络层面有效利用能

源的目的, 在路由协议中仅仅针对能量本身对算法进行优化是不够的. 事实上, 在高密度用户区域建立路由时, 由于用户干扰的增加, 为了保证一定的包差错率(Packet Error Rate), 在算法和电路上都会产生额外的能量消耗, 降低网络层面能量的利用效率. 因此, 在路由选择时必须考虑多用户干扰(Multi-User Interference, MUI)因素, 避免选择 MUI 大的节点做为路由节点, 如图 4 所示. 图 4(a) 中 9 号节点的 MUI 较大, 图 4(b) 显示优化后的路由避开了 9 号节点.

#### (4) 链路可靠性

在文献[35]中指出, 由于网络条件变化或节点移动, 随着信道的动态变化, 不可避免的出现链路的建立和撤销的情况, 并引起邻居节点发现和邻居节点消失等问题. 由于链路的高度不稳定性, 引起路由的频繁重建, 一方面带来了巨大的开销, 另一方面导致 QoS 的降低. 为了避免这些负面影响, 在路由建立时必须考虑链路的可靠性因素, 选择统计意义上可靠性较高的链路形成路由. 此外, 对于从源节点到目的节点路径上信道切换次数和信道切换频率也应当加以综合考虑<sup>[13]</sup>.

#### (5) 负载均衡

在路由设计时还必须重视负载均衡问题<sup>[13]</sup>. 如果仅从上述孤立的指标出发进行路由设计, 很可能导致某些符合指标要求的节点负载过大, 从而出现性能上的瓶颈, 或者由于能耗过高而提前死亡. 因此, 上述指标不应当被孤立地、割裂地看待, 而是应当在一个以应用为导向的大的框架下进行综合考虑. 为了达到全局的最优, 甚至需要在应用的大背景下对这些技术指标进行适当的折衷.

## 4 认知无线网络路由研究成果分析

目前, 同“认知网络”概念相关的路由方面的研究成果主要有以下几种类型: 一是专门的认知无线网络路由研究, 提出了明确的路由算法或协议, 或者提出了路由优化方法, 如文献[13~16, 18, 21, 23, 35~41]等; 二是在研究认知无线电及其网络的其他问题时, 对路由中可能涉及的某些问题或环节进行了一定的讨论, 虽然路由并不是研究的主要目的, 也没有提出成型的路由算法或协议, 但是某些结论可以在路由设计中借鉴<sup>[8~12, 17, 25, 42~45]</sup>; 三是研究以认知网络路由为题, 如研究认知无线接入网络(Cognitive Wireless Access Networks)路由<sup>[46]</sup>和认知信息包网络(Cognitive Packet Network)路由<sup>[47, 48]</sup>等, 但以传统的 Ad hoc 网络或 IEEE 802.11 系列网络等为研究对象, 同认知无线网络相比, 研究环境和对象的差别很大, 借鉴价值有限. 在本节, 我们主要对第一类直接研究认知无线网络路由问题的有代表性的文献进行分析和讨论.

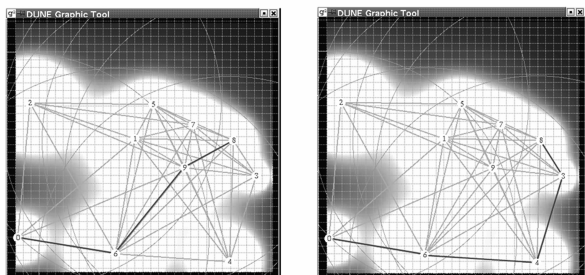


图4 MUI对路由选择的影响<sup>[35]</sup>

## 4.1 研究场景分析

认知无线网络路由研究无论在考虑问题的角度,还是在考虑问题的方法上,都同传统网络的路由研究有很大的差异.加上目前缺乏成熟的、统一的认知无线网络实验平台或原型系统可供借鉴,因此在路由研究中通常要对研究涉及的场景,包括介质、信道、节点和网络等进行一定的设计.这些设计构成了路由研究的前提和基础,对路由算法和协议的形成,有着决定性的影响.通过对代表性文献的分析,将研究中经常用到的场景设计加以归纳列于表 1,以供在研究中参考.

表 1 认知无线网络路由研究场景设计

设计对象	场景设计内容	简要分析
介质	频谱空洞同地理位置相关,随时间缓慢变化 <sup>[37,41]</sup>	频谱空洞随时间和空间位置变化这是研究的基本前提,意味着不同的节点拥有不同的可用信道集.频谱空洞随时间的缓慢变化降低了研究的难度.为了进一步降低研究难度,在文献 <sup>[37]</sup> 基于簇的路由研究中,进一步假设在簇形成过程中频谱空洞不变.
信道	存在节点之间用于数据交换的可用信道集 <sup>[13]</sup> 存在节点之间用于控制信息交换的公共控制信道 <sup>[13,15,16]</sup> 或局部控制信道 <sup>[37]</sup> 任意时刻发信机只能工作在一个信道上 <sup>[23]</sup>	节点拥有可用信道集事实上是蕴含于所有文献的基本假设,是研究的基础.在任意时刻,通信范围内节点的可用信道集应当有交集.在网络每个链路上,路由基于可用信道而决定.节点应当具备公共(局部)控制信道拥塞后更换控制信道的能力.任意时刻发信机只能工作在一个信道上排除了多接口并行通信的可能,降低了研究难度.
节点	节点均是 CR 节点 <sup>[37,41]</sup> 节点数量固定且对所有节点已知 <sup>[15]</sup> 节点 ID 的分配范围预先确定 <sup>[13]</sup> 节点时间同步 <sup>[13]</sup> 节点地理位置自知 <sup>[13,41]</sup> 节点可以低速移动 <sup>[37]</sup>	节点均为 CR 事实上是蕴含在所有文献的基本假设,并且在研究中一般不直接考虑主用户的存在,也没有考虑同主用户建立路由的问题.主用户对路由的影响,一般抽象为动态变化的信道对路由的影响.节点数量固定且对所有节点已知、节点 ID 的分配范围预先确定、节点时间同步在多数研究中未涉及.节点地理位置已知的假设,同具体的研究(如最短路径路由研究)有关.节点移动性问题在大多数研究中没有考虑,移动节点增加了研究的难度.
网络	网络具备分布式控制能力 <sup>[37,41]</sup>	网络具备分布式控制能力事实上是所有研究对网络的隐含假设和研究的基本前提.

## 4.2 主要研究成果

目前认知无线网络路由研究成果主要可以分为两类:一类主要集中在路由拓扑算法和协议的设计上,一般也同时提出了路由的优化方案;另一类主要集中在路由优化方案的设计和实现上,对于路由拓扑算法和协议本身考虑得并不多.表 2 给出了目前直接以认知无线网络路由为研究对象的代表性成果.从表 2 可以看出,路由拓扑控制算法以平面多跳路由居多,基于簇的路由方案亦有人考虑;路由优化方案以针对延时的

优化居多,传统的针对最短路径的优化方案不是主流.综合来看,在认知无线网络路由优化中,仅考虑延时这一项指标是不充分的,因此文献<sup>[14,35,36,40]</sup>在路由优化方案的理论研究中,考虑了多种因素对路由的影响,如表 2 所示.

表 2 认知无线网络代表性的路由研究成果

研究成果	适用路由类型	主要研究对象		提出的主要优化方案
		算法协议	优化方案	
[18]	平面多跳	✓	能量最优	能量最优
[35,36]	平面多跳	✓	多指标 <sup>1</sup> 线性组合优化	多指标 <sup>1</sup> 线性组合优化
[13]	平面多跳	✓	最小延时、信道切换频率	最小延时、信道切换频率
[21]	平面多跳	✓	最小权重 <sup>2</sup>	最小权重 <sup>2</sup>
[14]	平面多跳	✓	多指标 <sup>3</sup> 混合整数线性规划	多指标 <sup>3</sup> 混合整数线性规划
[15,16]	平面多跳	✓	最小延时	最小延时
[40]	平面多跳	✓	能力约束 <sup>4</sup>	能力约束 <sup>4</sup>
[23]	平面多跳	✓	延时与信道切换增益	延时与信道切换增益
[41]	簇结构	✓	最短路径	最短路径
[37,38,39]	簇结构	✓	最小成簇数	最小成簇数

注:1 考虑同步、能耗、多用户干扰、可靠性、流量、延迟、电池自持力、同窄带系统的共存等因素.

2 权重同无线通信系统有关.通信距离远,权重较大;反之权重较小.

3 考虑链路分配、信道干扰、节点无线电接口限制、多径路由流量限制等因素.

4 基于干扰源、基于带宽和转发流量的代价函数.

下面我们从路由优化方案和路由拓扑算法(协议)两个方面,对表 2 所示的现有主要研究成果进行讨论.

### (1) 路由优化方案

在文献<sup>[18]</sup>中提出了一种基于能量利用效率的优化方案.节点通过比较它周围  $n$  跳邻居节点的能耗情况,然后找出需要耗费最多能量才能通信的子节点,将其从自己的子节点中去掉,通过改写路由表将它作为其  $n$  跳范围内其他节点的子节点,以提高  $n$  跳范围内节点的能量利用效率.在文献<sup>[35,36]</sup>中针对 UWB 系统,对同步、能耗、多用户干扰、可靠性、流量、延迟、电池自持力,以及同窄带系统的共存等因素对路由的影响做了形式化描述,并将上述指标以不同系数线性组合,提出了认知路由代价公式,并以此作为路由策略对 IEEE 802.15.4a 网络的多跳路由进行了优化.仿真结果显示,在引入外部干扰的情况下,路由策略单纯地考虑能量问题不足以延长节点的生命期.在考虑外部干扰因素的情况下,网络生命期有更好的表现,并可改善吞吐量和延时.在文献<sup>[14]</sup>中,综合考虑链路分配、信道干扰、节点无线电接口限制和多径路由流量限制,运用混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)方法来优化路由问题.在文献<sup>[40]</sup>中,重新定义了基于最短路径路由的代价函数,提出了基于干扰源的代价函数和基于带宽和转发流量的代价函数(作者称为能力约束 - Capacity Constrain).基于能力约束路由的性能

比基于最短路径路由的性能提高了 30% 的 AAOC (Average Achievable Originating Capacity). AAOC 是组成路由的所有链路上, 分配给节点用于执行路由任务的能力的最小值.

## (2) 路由拓扑算法(协议)

在文献[13]中, 作者定义在任意时刻认知无线网络处于两种状态之一: 基于 MAC 层的周期性控制信道配置状态和正常工作状态. 在每个 MAC 层配置周期, 各节点以 TDMA 方式在不同的时隙广播自己的节点 ID、节点可用信道集、临近节点列表、节点坐标和全局信道集等, 其他节点在该时隙记录. 通过周期性的 MAC 层配置, 节点获得网络的全局视图. 在此基础上, 作者给出了基于最小延时和基于信道切换频率的两种路由实现方式. 基于最小延时的路由服从  $\min(T_{lat} = d \times t_{hop} + s \times t_{sw})$  的约束, 式中  $T_{lat}$  表示路径全局延迟,  $d$  和  $s$  分别为跳数和信道切换数,  $t_{hop}$  和  $t_{sw}$  为 1 跳传播延迟和信道交换延迟. 在基于信道切换频率的路由下, 节点总是选择可用概率最高的信道做为下一跳路径使用的信道. 由于这是一个以节点为中心, 在节点仅掌握局部信息的前提下做出的决定, 因此有可能导致路由中较多的信道切换次数. 文献[13]提出的方案由于使用 TDMA 方式广播节点信息, 因此开销和时间效率都是需要认真考虑的问题.

在文献[21]中, 节点使用 CLCR 来执行邻居节点发现和路由信息交换过程, 交换的信息包括通信频率、介质控制方法等, CLCR 在各节点上的实现相同. 在此基础上, 节点选择最有效的通信链路(信道)来建立基于最小权重(Weight)的路由, 即从源节点到目的节点每一段链路的权重的和最小. 链路的权重等于发和收节点使用的无线通信系统的权重, 同通信距离有关. 在通过 CLCR 发现邻居节点时, 使用权重大(通信距离远)的通信系统, 以最大限度的发现节点并广播可用的无线通信系统信息. 而在建立路由时, 根据得到的无线通信系统信息, 使用权重尽可能小的通信系统来建立数据传输链路. 文献[21]中所谓最小权重策略事实上是能耗最低策略. 当然, 权重也可以由能量、数据发送率和链路可靠性等来表征, 这在该论文中未做讨论.

在文献[15, 16]中, 通过公共控制信道发送控制信息 RREQ 和 RREP. 路由建立过程从源节点向邻近节点发送 RREQ 消息开始, 其中含有节点的可用信道信息 SOP (Spectrum Opportunities). 邻近节点收到 SOP 后, 如果消息中封装的 SOP 同节点自己的 SOP 有交集, 则附加上自己的 SOP 后转发 RREQ; 如果不存在交集, 则抛弃该消息. 当目的节点收到 RREQ 后, 根据路径累积延时最小原则(即  $\min D_{rout, m}, D_{rout, m}$  见公式(1)), 在 RREQ 中

封装的 SOP 同自身 SOP 交集中选取一个信道, 并封装到 RREP 消息中发送给向它发送 RREQ 消息的节点(事实上为路由中的中间节点), 作为二者之间通信的信道. 其他中间节点收到 RREP 后, 按同法处理, 直至到达源节点. 源节点收到 RREP 消息后, 根据 RREP 中记录的路由节点和信道信息, 开始数据传输.

在文献[23]中, 路由建立过程同文献[15, 16]类似, 同样包括从源节点到目的节点发送 RREQ 消息, 以及从目的节点到源节点发送 RREP 消息建立反向路由两个过程. 所不同的是, 文献[23]不依赖公共控制信道, 因此 RREQ 消息在当前节点所有可用信道上广播. 文献[23]定义了一类特殊的节点, 称为交换节点. 交换节点上有多个业务流, 需要通过不同的信道传输. 为了避免“耳聋”问题, 交换节点在切换信道时, 先在原信道广播 LEAVE 消息, 尔后在新信道上广播 JOIN 消息. 当节点收到 LEAVE 消息后, 不会向交换节点发送数据包, 直到收到 JOIN 消息为止.

在文献[37~39]中, 提出了基于簇的路由组织方式. 文献[37]中节点划分为三类, 即簇首、网关节点和普通节点, 后两者事实上都是簇成员. 节点从频率由低到高的顺序搜索可用信道, 有三种情况: 一是信道上无任何信息, 这说明该信道上既无簇首也无簇成员. 如果所有可用信道均如此, 则节点自行成簇. 二是信道上已有簇首广播的 Beacon 信息, 这说明在 1 跳内有簇首存在. 节点向该簇首提出加入申请, 如果被拒绝(比如簇已满或密度太大等情况), 则在其他可用信道上继续搜索. 如果全部可用信道上的簇首都拒绝节点加入簇, 则节点自行成簇. 三是信道上已有邻居节点信息但没有 Beacon 信息. 这说明 1 跳内有邻居节点(属于某簇), 但节点与簇首的距离为 2 跳. 在这种情况下, 节点和邻居节点交换可用信道等节点信息(用于簇之间的互联)后, 继续搜索其他可用信道. 如果节点在完成对所有可用信道的 1 到 2 次搜索后都不能加入簇, 则节点自行组簇. 簇建立后, 相邻簇通过网关节点互联. 当相邻簇有交叠时, 至少有一个成员节点(属于两个相邻簇之一)是两个相邻簇簇首的 1 跳邻居节点, 则以此节点为网关节点交换数据. 当相邻簇无交叠时, 若各有一个分属于不同簇的成员节点, 二者之间是 1 跳邻居关系, 则以他们为网关节点交换数据.

文献[41]是一个基于簇和节点地理位置信息的路由协议, 其簇建立和维护过程基本同文献[37], 并假设节点坐标自知. 在文献[41]中提出了一个基于最短路径的 CLR (Clustered Location-based Routing) 算法, 簇间路由选取的依据是距离目的节点距离最短原则: 源节点发送的 Route Request 包含有目的节点信息, 当源节点所在簇簇首收到 Route Request 包后, 选择距离目的节点最近

的邻居簇首发送 Route Request 包,依此类推,直到到达目的节点所在簇的簇首为止。

## 5 总结与展望

通过对认知无线网络路由主要研究成果的分析,我们可以看到当前研究虽然在路由优化上考虑到了认知无线网络的一些特性,如多用户干扰、同窄带系统的共存、信道(链路)分配、节点无线电接口限制等,但在路由实现机制上,仍然没有摆脱传统的 Ad hoc 网络路由模式.这一问题的主要表现,是对“认知”这一认知无线网络活动的根本属性认识不清,没有能够从底层机制的高度反映并结合认知无线网络分布式认知活动这一本质特性,在路由机制设计时没有充分考虑网络元素(即分立的认知无线电设备)对客观环境(包括网络环境和应用环境)的感知和交互,没有充分利用认知活动来为路由服务.所以,当前的路由协议(算法)虽然对解决某一特定方面的问题有一定的贡献,但是从机制角度来讲,并没有提出一个非常适合认知无线网络内在要求的解决方案。

在目前认知无线网络路由研究中,讨论得比较多的是基于基础设施的网络,即由主用户(Primary User, PU)和次用户(Secondary User, SU)共同组成的网络.节点角色(即是 PU 还是 SU)在网络部署前已经确定,并且在网络生存期内保持不变.在这种网络部署方式上对平面型网络路由进行讨论,是目前研究的主流.事实上,对于认知无线网络来说,同基于基础设施的网络相对,我们还可以抽象出一种无基础设施的网络,其节点在部署前并无本质区别,节点角色在部署后根据应用和网络的需要确定,并且可以动态改变.在这种网络中,PU 和 SU 只是相对意义上的.无基础设施的层次型网络,特别是基于簇的无基础设施的层次型网络,在军事上有极为重要的应用价值,但是目前对其的研究还很不充分.对层次型网络路由的研究,应当成为今后研究的一个重点领域。

此外,由于认知无线网络路由研究才处于起步阶段,目前研究成果对路由研究场景的假设各异,并且缺乏通用的性能评价指标体系,这在一定程度上妨碍了研究成果的横向比较和交流.因此,提出典型的认知无线网络路由研究场景设计方案,以及实用的软、硬件仿真平台,建立科学的、符合认知无线网络特点和内在规律的性能评价指标体系,也是今后研究工作中的一个重点。

### 参考文献:

[1] Mitola J, Maguire G Jr. Cognitive radio: making software radio more personal[J]. IEEE Personal Communications Magazine,

1999,6(4):13-18.

- [2] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[A]. Proceedings of IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99)[C]. San Diego: IEEE, 1999. 3-10.
- [3] J Mitola III. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [4] FCC. Notice of Proposed Rule Making and Order (ET docket no. 03-322)[R]. USA: FCC, 2003. 1-53.
- [5] FCC. Spectrum Policy Task Force Report (ET docket no. 02-135)[R]. USA: FCC, 2002. 1-73.
- [6] FCC. Notice of Inquiry and Notice of Proposed Rulemaking (ET docket No 03-237)[R]. USA: FCC, 2003. 1-22.
- [7] G Staple, K Werbach. The end of spectrum scarcity[J]. IEEE Spectrum, 2004, 41(3): 48-52.
- [8] Ruiliang Chen, Jung-Min Park, Hou Y T, Reed J H. Toward secure distributed spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 50-55.
- [9] Bansal, G, Jahangir Hossain M, Kaligineedi P, et al. Some research issues in cognitive radio networks[A]. Proceedings of AFRICON IEEE Conference[C]. Windhoek: IEEE, 2007. 1-7.
- [10] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 32-39.
- [11] Akyildiz I F, Won-Yeol Lee, Vuran M C, Shantidev Mohanty. A survey on spectrum management in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 40-48.
- [12] Baldo N, Zorzi M. Fuzzy logic for cross-layer optimization in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 64-71.
- [13] Krishnamurthy S, Thoppian M, Venkatesan S, Prakash R. Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks[A]. Proceedings of Military Communications Conference (MILCOM)[C]. Atlantic City: IEEE, 2005, (1): 455-460.
- [14] Miao Ma, Tsang D H K. Joint spectrum sharing and fair routing in cognitive radio networks[A]. Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)[C]. IEEE Press, 2008. 978-982.
- [15] Cheng G, Liu W, Li Y, Cheng W. Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. IEEE Press, 2007. 6499-6503.
- [16] Cheng Geng, Liu Wei, Li Yunzhao, Cheng Wenqing. Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks[A]. Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)

- [C]. IEEE Press, 2007. 571 – 574.
- [17] R W Thomas, L A DaSilva, A B Mackenzie. Cognitive networks[A]. Proceedings of IEEE International Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)[C]. IEEE Press, 2005. 352 – 360.
- [18] Thomas R W, DaSilva L A, Marathe M V, Wood K N. Critical design decisions for cognitive networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. IEEE Press, 2007. 3993 – 3998.
- [19] Celebi H, Arslan H. Utilization of location information in cognitive wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(4): 6 – 13.
- [20] Nolan K E, Doyle L E. Teamwork and collaboration in cognitive wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(4): 22 – 27.
- [21] Chang Woo Pyo, PMikio Hasegawa. Minimum weight routing based on a common link control radio for cognitive wireless Ad hoc networks[A]. Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing [C]. ACM Press, 2007. 399 – 404.
- [22] T Clausen, C Dearlove, J Dean. MANET neighborhood discovery protocol [OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-nhdp-06>, 2008-8-25.
- [23] Huisheng Ma, Li li Zheng, Xiao Ma, Yongjian Luo. Spectrum aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver[A]. Proceedings of Third International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)[C]. Singapore: IEEE Press, 2008. 1 – 6.
- [24] J So, N H Vaidya. A routing protocol for utilizing multiple channels in multi-hop wireless networks with a single transceiver [OL]. <http://www.crhc.illinois.edu/wireless/papers/multichannel-routing.pdf>, 2004. 10.
- [25] Ian F Akyildiz, Won-yeol Lee, Mehmet C Vuran, Shantidev Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127 – 2159.
- [26] Shakkottai S, Rappaport T S, Karlsson P C. Cross-layer design for wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(10): 74 – 80.
- [27] Srivastava V, Motani M. Cross-layer design: a survey and the road ahead [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(12): 112 – 119.
- [28] Foukalas F, Gazis V, Alonistioti N. Cross-layer design proposals for wireless mobile networks: a survey and taxonomy[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(1): 70 – 85.
- [29] Baldo N, Zorzi M. Fuzzy logic for cross-layer optimization in cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 64 – 71.
- [30] Hang Su, Xi Zhang. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 118 – 129.
- [31] Saeed R A, Khatun S, Ali B, Abdullah K. Ultra-wideband interference mitigation using cross-layer cognitive radio [A]. Proceedings of IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks [C]. Bangalore: IEEE Press, 2006. 1 – 5.
- [32] Q Wang, H Zheng. Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks [A]. Proceedings of the 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CNCC) [C]. IEEE Press, 2006, (1): 625 – 629.
- [33] C Xin. A novel layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks [A]. Proceedings of IEEE International Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)[C]. IEEE Press, 2005. 308 – 317.
- [34] Vikas Kawadia, P R Kumar. A cautionary perspective on cross-layer design [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(1): 3 – 11.
- [35] Di Benedetto M G; De Nardis L. Cognitive routing in UWB networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Ultra-Wideband [C]. IEEE Press, 2006. 381 – 386.
- [36] Maria-Gabriella Di Benedetto, Luca De Nardis. Cognitive routing models in UWB networks [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom) [C]. Singapore: IEEE Press, 2008. 1 – 6.
- [37] Frank H P Fitzek, Marcos D Katz. Cognitive wireless networks [M]. Netherlands: Springer Press, 2007. 657 – 678.
- [38] Tao Chen, Honggang Zhang, Maggio G M; Chlamtac I. CogMesh: a cluster-based cognitive radio network [A]. Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) [C]. IEEE, 2007. 168 – 178.
- [39] Tao Chen, Honggang Zhang, Maggio G M, Chlamtac I. Topology management in CogMesh: a cluster-based cognitive radio mesh network [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. IEEE, 2007. 6516 – 6521.
- [40] Yiming Liu, David Grace. Improving capacity for wireless Ad hoc communications using cognitive routing [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom) [C]. Singapore: IEEE, 2008. 1 – 6.
- [41] Fangmin Xu, Luyong Zhang, Zheng Zhou, Yabin Ye. Spectrum-aware location-based routing in cognitive UWB network [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Cog-

- nitive Radio oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)[C]. Singapore: IEEE, 2008. 1 – 5.
- [42] David Wilkins, Grit Denker, Mark-Oliver Stehr, et al. Policy-based cognitive radios [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(4): 41 – 46.
- [43] Adamopoulou E, Demestichas K, Theologou M. Enhanced estimation of configuration capabilities in cognitive radio [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 56 – 63.
- [44] Yarkan S, Arslan H. Exploiting location awareness toward improved wireless system design in cognitive radio [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(1): 128 – 136.
- [45] Wyglinski A M. Cognitive radio communications and networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 30 – 31.
- [46] Bing Zhang, Takizawa Y, Hasagawa A, Yamaguchi A, Obana S. Tree-based routing protocol for cognitive wireless access networks [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. IEEE Press, 2007. 4204 – 4208.
- [47] Gelenbe E, Peixiang Liu. QoS and routing in the cognitive packet network [A]. Proceedings of Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM) [C]. IEEE Press, 2005. 517 – 521.

- [48] Lent R. Linear QoS goals of additive and concave metrics in Ad hoc cognitive packet routing [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 2006, 36(6): 1255 – 1260.

#### 作者简介:



滑楠男, 1974年6月出生. 清华大学博士后, 空军工程大学副教授. 1995年、2002年和2007年分别在空军电讯工程学院和西北工业大学获得工学学士、工学硕士和工学博士学位. 目前主要从事认知无线网络、无线自组织网络和无线传感器网络等方面的研究工作.

E-mail: ehn@163.com



曹志刚男, 生于上海. 教授、博士生导师. 1962年毕业于清华大学无线电系. 目前的研究领域包括认知无线电、宽带移动通信、卫星通信等. E-mail: czg-dee@tsinghua.edu.cn