

# 北京邮电大学

## 本科毕业设计（论文）



题目：认知无线电系统组网研究

姓 名 李孟辉

学 院 信息与通信工程学院

专 业 通信工程

班 级 2014211118

学 号 2014210506

班内序号 04

指导教师 郭文彬

2018 年 5 月

# 北 京 邮 电 大 学

## 本科毕业设计（论文）任务书

学院	信息与通信工程学院	专业	通信工程	班级	2014211118					
学生姓名	李孟辉	学号	2014210506	班内序号	04					
指导教师姓名	郭文彬	所在单位	信息与通信工程学院	职称	教授					
设计(论文)题目	认知无线电系统组网研究 Research on cognitive radio adhoc networking technology									
题目分类	工程实践类 <input type="checkbox"/> 研究设计类 <input checked="" type="checkbox"/> 理论分析类 <input type="checkbox"/>									
题目来源	题目是否来源于科研项目      是 <input checked="" type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>									
主要任务及目标： <ul style="list-style-type: none"> <li>• 认知无线电通过感知频谱环境，自适应调整通信的方式，达到有效利用空闲频谱资源的目的，从而缓解无线资源紧张的矛盾。由于认知用户是非授权用户，如何实现认知多用户之间的组网问题是认知自组网的关键问题。本课题研究认知自组网的组网策略及协议设计，给出相关性能分析或仿真。</li> </ul>										
主要内容： <p>文献阅读与课题综述报告，通过文献检索与阅读，给出认知无线自组网中多用户组网的研究现状分析报告。</p> <p>针对认知自组网中多用户组网建模，研究不同场景下多用户组网的策略，给出理论或仿真分析。</p>										
主要参考文献： <ul style="list-style-type: none"> <li>• 洪一诺，北京邮电大学硕士论文，2017.</li> <li>• 吴锐，北京邮电大学硕士论文，2016.</li> <li>• 王宇昆，北京邮电大学硕士论文，2018</li> </ul>										
进度安排： <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2017 年 12 月-2018 年 3 月，文献阅读与综述报告完成；</li> <li>• 2018 年 3 月-2018 年 5 月，完成认知无线自组网建模与仿真分析。</li> <li>• 2018 年 5 月-2018 年 6 月，完成论文撰写</li> </ul>										
指导教师签字		日期	年    月    日							

北 京 邮 电 大 学

本科毕业设计（论文）诚信声明

本人声明所呈交的毕业设计（论文），题目《社交网络多媒体信息可信度评估》是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

# 认知无线电系统组网研究

## 摘 要

随着无线频谱资源的不断使用,为了满足人类社会对于通信的需求,认知无线电组网技术应运而生,成为了缓解频谱压力的一大研究热点方向。传统的认知网络使用中心控制结构,依靠控制中心,例如基站,基站可以辅助认知无线电设备发现临近的用户与接入节点,不断的更新邻近用户的信息,在本地网中发送节点以无线自组网的方式建立与接收节点的通信路径,并能够通过基站建立与其它本地网接收节点的单点与多点通信。但是这种方式受制于控制中心地理位置,不符合日后移动认知网络的需求,如果采用固定信道作为控制信道则会浪费大量频谱资源这是与认知无线电的原则相违背的。

为了满足非固定式的认知自组网的建立需求,本文研究了与组网相关的以下内容:信道交汇,对授权用户与认知用户进行建模,实现环境感知与基于 CGB 算法的自动跳频完成相邻节点交汇;拓扑发现:研究了不同指标下的两种拓扑发现方法,给出了相关协议与发现过程的代码仿真分析;路由选择与数据传输:对于不同的组网要求给出了两种路由选择与传输的数据包类型,分析了各个模式下的网络性能。

**关键词** 认知无线电 自组网 拓扑发现 路由协议

# **Research on cognitive radio adhoc networking technology**

## **ABSTRACT**

With the continuous use of wireless spectrum resources, cognitive radio networking technology was born for human society's need for communication, and has become a hot research topic to relieve the spectrum pressure. Traditional cognitive networks use a central control structure, which depends on its control center like BS. BS can auxiliary cognitive radio equipments to find adjacent users and access nodes. so that SUs can update information for adjacent users. In this network, the communication path of the receiving node is established by wireless ad-hoc network so the sending nodes can establish a single point or multi-point communication with other local network receiving nodes. by the BS. But because of the location of the control center, this kind of network can't meet the needs of mobile cognitive networks in the future. And choosing a fixed channel as control channel will waste a lot of spectrum resource, which is contrary to the principle of cognitive radio.

To meet the need of cognitive radio network, this paper studies the following contents related to network :Channel intersection, modeling the activity of PUs and SUs, realization of the environment perception and the CGB algorithm based on automatic frequency hopping to Realization of the environment perception and the CGB algorithm based on automatic frequency hopping to complete intersection with adjacent nodes .Topology discovery, two methods of topology discovery under different indexes are studied, and the code simulation analysis of relevant protocol and discovery process is given. Routing and data transmission, the data packet types of two kinds of routing and transmission are given for different network requirements, and the network performance under each mode is analyzed.

**KEY WORDS** cognitive radio   adhoc networks   topology discovery   routing protocol

# 目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及意义	1
1.2 面临的问题与研究内容	2
1.3 认知无线电自组网发展现状	2
1.3.1 认知无线网络架构	2
1.3.2 感知学习过程	3
1.3.3 节点交会过程	4
1.3.4 拓扑发现过程	4
1.3.5 路由发现与数据传输过程	4
1.4 认知自组网关键算法发展	4
1.4.1 频谱感知	4
1.4.2 频谱决策	5
1.4.3 频谱共享	5
1.4.4 频谱移动	6
1.4.5 路由协议	6
1.5 论文组织结构	6
第二章 认知自组网算法	7
2.1 系统建模	7
2.1.1 主用户行为建模	7
2.1.2 认知用户行为建模	8
2.2 点对点节点交会算法	8
2.3 拓扑发现过程	10
2.3.1 用户初始化	10
2.3.2 节点交会	11
2.3.3 成簇	11
2.3.4 最短拓扑发现	13
2.4 路由算法	15
2.4.1 按需路由协议	15
2.4.2 先验路由协议	17
2.5 数据传送	17

第三章 仿真结果分析 . . . . .	19
3.1 组网时间 . . . . .	19
3.1.1 通信半径的影响 . . . . .	19
3.1.2 认知设备数目与主用户数目的影响 . . . . .	20
3.1.3 主用户变化概率的影响 . . . . .	20
3.2 组网成功率 . . . . .	21
3.3 网络健壮性 . . . . .	22
3.4 路由与数据传送性能 . . . . .	24
3.4.1 可用路由数目 . . . . .	24
3.4.2 网络平均寿命 . . . . .	26
3.4.3 传送数据类型 . . . . .	27
3.5 拓扑发现的另一种方案 . . . . .	28
第四章 总结与展望 . . . . .	29
4.1 论文总结 . . . . .	29
4.2 论文展望 . . . . .	29
参考文献 . . . . .	30
致    谢 . . . . .	31

# 第一章 绪论

## 1.1 选题背景及意义

无线电频谱是非再生资源并且是国家的战略资源,许多无线通信方式需要在政府划分的频带下工作,这些频段也被称为授权频段,但是随着无线通信技术的发展,以及也有像 700Mhz 的通信黄金频段分配给广电总局进行无线电视的建设,这种分配方式使用效率极为低下,不符合与时俱进的无线通信的需要。无线局域网,蓝牙, zigbee 等技术应用更为广泛导致了在 ISM 频段上也十分拥挤,这使得频带的整体使用率并不高而且在不同频段使用效率十分不平衡,频谱资源和卫星轨位需求愈加旺盛,需求增长与频谱的静态分配带来的频谱稀缺问题日益浮现,规避拥堵的非授权频段,而在使用效率低下的授权频段内进行通信成为了解决这一问题的可行方案。

认知无线电技术一经提出就被广泛讨论研究,认知无线电采用动态频谱分配策略(DSA),未授权用户或者辅助用户(SU)可以在授权频段内的自主寻找和使用未被授权用户(PU)占用的空闲的频谱资源,在时间和空间上同时增加频谱的使用效率。通过对周围环境的感知,调整自身工作最适当的频段与调制类型等参数,从而实现认知设备间的通信。

认知无线网络即认知设备间的网络,是一种多信道多节点无线网络,具有优秀的频谱复用性能与巨大的覆盖面积,拥有与传统无线通信网络不同的特点:认知无线网络可以与普通无线通信网络共存并且不会产生干扰,其独特的认知功能可以智能分配无线资源,使得认知设备进行正常通信的同时不干扰授权频段内的其他系统的通信;系统支持多信道通信且不再具有传统网络的控制中心(例如基站),整个认知网络将会处于不同系统同时工作的嘈杂频谱背景中,这便要求网络不再使用统一固定的信道从而避免了盲节点的产生,而应该随着周围环境的改变做出适应性变化,来保证信道可用的基础上满足通信的 QoS 需求,同时由于网络中每个认知设备所处的环境并不完全一致,若是想要达到最佳的通信效果应当舍弃控制中心进行集中管理,而是采用分布式的管理方式来配合移动终端状态快速变化的特点,控制中心不再以实体形式存在,而是用控制中心频率进行节点间信息的交换,每个认知设备都将具有完备的认知通信功能,可以同时作为管理节点与通信节点,这是目前的民用移动无线网络所不具备的特点。

得益于认知自组网优秀的认知能力,认知自组网在不同的频谱占用情况下都可以寻找到合适的通信频段,在多种系统同时工作的环境中,认知设备的认知能力可以自主选择信道并满足自身的 QoS 需求,并且可以节省人工配置通信参数的成本,对于在医院,商场等活动设备密度高的场所建设内网有着天然的优势,由于认知设备周期性进行频谱感知,使得整个认知网络具有优秀的重构性能,在当前信道由于主用户活动不再可用时不会发生长时间的链路断裂而是直接跳跃到其他信道进行通信,CR 设备可以根据无线环境动态编程,可以重构工作频率、调制方式、发射功率和通信协议等重要参数。同时



由于是分布式管理，网络结构不会因为管理节点的瘫痪而无法通信，这也使得认知网络的重构性能更为优秀。相比于传统通信网络，认知无线网络的多信道通信模式可以更好的适应当前的无线环境，并且可以满足某些特殊的通信需求，在军用、民用方向都有着不同的优势。

## 1.2 面临的问题与研究内容

认知无线电原则上是为了提高频谱的利用率，不应该一直占用信道进行控制信息的传送。但是这也是大多交汇算法的形式，它需要协商某频率作为控制信道来让想要加入的用户可以直接在该信道上发布信息，这种方法要求我们必须使用某一个频带，而这与将会降低该频带上的频谱利用率，所以应当舍弃固定频率公共控制信道的想法，寻找一种不需要固定的公共控制信道就能完成网络配置的组网策略。

组网并非是两个节点之间的连接，比如蓝牙之类的主从设备配对，而应该是多节点之间互相通信，虽然双节点之间的信道交汇已经有很多策略，但是多点的组网策略与拓扑发现仍然还是初步发展，应当在节点交汇的基础上完成网络的构建。组网过程很重要的就是拓扑发现，此过程决定了网络的连通性，这也会是后期的路由协议设计以及数据传输的基础，起到了而在拓扑发现的过程中也是会存在网络主用户的干扰，这将会对信道可用率产生很大的影响，因此这也是多点组网的难点所在。

自组网不能再任何时候都进行主用户的检测同时维护整个网络拓扑，也不能在任何阶段都允许新节点的加入。虽然为了使得所有节点都尽可能同时加入某一个网络，可以延长整个拓扑建立的时间（周期数），但是组网的一个重要指标便是组建网络的时间消耗，为了整个网络的快速建立应当减少每个阶段的耗时，这两者的要求便会产生矛盾，如何平衡两者之间的需求来达到最佳的认知自组网络的性能，也是需要解决的问题。

论文的主要研究内容如下：

- (1) 认知节点与主用户节点建模
- (2) 研究节点交汇算法与拓扑发现
- (3) 给出了两种信道中传输数据类型与相应的路由模式，分析不同情况下网络性能

## 1.3 认知无线电自组网发展现状

### 1.3.1 认知无线电网络架构

所谓组网，是指多节点之间根据某一协议完成互相之间信息的传输，形成一个具有完备的路由功能的通信整体。不同的网络架构拥有不同的组网算法与功能，认知无线电的网络架构主要有两种：控制中心型网络架构，分布式网络架构。

控制中心型网络架构即集中式网络架构，也是传统认知无线通信网络的典型架构，在这种架构中，如图所示，认知设备与主用户处于相邻环境中，也就是意味着会有管理

主用户的中心控制器，此控制器可同时对于通信范围内的认知设备进行管理，所有认知设备可以不具有完备的认知网络组件功能，由中心控制器负责无限资源的管理，需要组网时每个认知设备向控制中心申请空闲频谱资源，从而可以不需要认知设备提前完成相邻节点之间的信道交汇，只需要从控制中心获取自身相关的传输参数就可以快速完成与其他节点的交汇，在此基础上就可以完成组网。此种网络架构的负载压力主要由中心控制器承担，所以中心控制器的认知性能与处理速度直接决定了整个认知网络的性能，整个网络性能将会受制于控制中心的地理位置，通信范围等通信指标，并不适合野外军事，医用的环境。

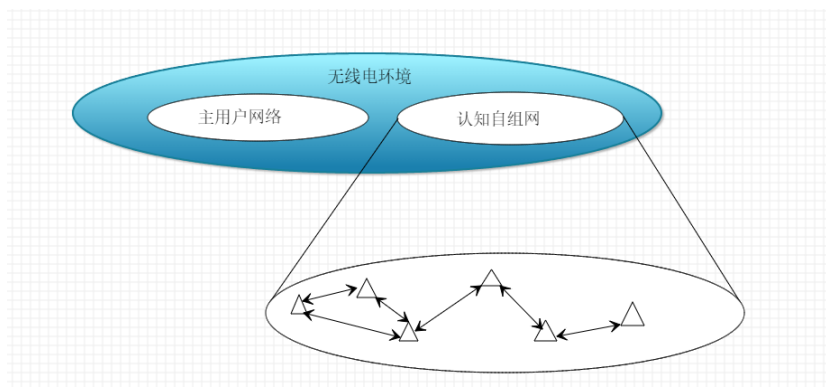


图 1-1 分布式网络架构

分布式网络架构，每个认知用户随机分布在不同位置，采用 Ad Hoc 模式，组成一个完整的认知网络。此种网络中每个认知设备地位平等，具有完备的认知自组网功能，同时负责路由器与终端的任务，每个终端自主学习周围环境并设计自身的通信参数。这种网络架构对于终端设备的要求提高，不过因为节点之间地位平等，不会因为某一个节点瘫痪造成整个网络的死亡，也正是由于分布式架构功能更为全面，整个组网过程的协议设计也相比更为困难。

本文针对第二种网络架构进行研究，网络中每个节点都会具备认知自组网的所有功能组件，相比集中式网络架构将会更为稳健与可靠。

### 1.3.2 感知学习过程

认知自组网系统的基础环节就是认知设备的感知学习过程，认知过程主要包括三个环节：频谱感知与分析，频谱决策，频谱共享。

- 频谱感知与分析：认知设备需要扫描通信范围内的所有可用频段以及主用户占用的频段，分析空闲频段的可用概率，信道质量等信息。
- 频谱决策：认知设备应当根据需要的服务类型定制数据传输速率，传输方式以及使用频段，此过程保证了最佳的点对点通信质量。

- 频谱共享：多个认知用户接入时都会进行频谱感知与数据传输，多个认知用户之间应当避免同时占用一个频段，频谱共享可以使得多认知用户分享频谱资源而不产生互相之间的干扰。

### 1.3.3 节点交会过程

认知自组网是一个多信道网络，每个无线电设备都会检测到大量频谱空穴，在需要组网时，每个认知设备会与邻居节点产生一条信道进行信息的交换，而节点间同时在某一个信道相遇则被称为节点交会。

### 1.3.4 拓扑发现过程

拓扑发现是在完成节点交汇的基础上获取整个网络结构的发现过程，网络研究界对捕获一个准确的网络拓扑结构图有极大兴趣，因为它有许多用途，是设计和评估新的协议以及服务的脆弱性分析是网络的基础。拓扑发现同样是认知自组网关键环节，是后续的路由设计的基础。

### 1.3.5 路由发现与数据传输过程

认知自组网是多跳网络，在拓扑发现完成之后需要进行路由的发现以完成完备的网络通信功能，由于区别于普通的集中式无线网络，认知无线电的路由发现需要考虑能耗，跳频时延等问题，需要不同的策略来获得最佳的认知设备适应性以及累积时延。

## 1.4 认知自组网关键算法发展

### 1.4.1 频谱感知

频谱感知分为辅助频谱感知技术与独立频谱感知技术，辅助频谱感知技术不对认知设备自身做频谱感知要求，但是需要由中心管理设备检测可用频谱，认知设备得到授权之后即可以直接使用此频段进行交汇，但是由于辅助频谱感知技术属于集中式网络架构，不符合认知自组网理念，所以主要介绍独立频谱感知技术的发展状况。

- 主用户检测：独立频谱感知技术中，每个 CR 用户通过不同的频谱检测机制检测主用户的活动，避开主用户的工作频段，目前主流的频谱感知算法都是基于主用户发射机的检测算法，其中包括：1) 匹配滤波器算法 2) 能量检测算法<sup>[1]</sup> 3) 特征检测算法<sup>[2]</sup> 4) 广义似然比检测，以上的算法可以满足不同的实际需求，所需求的信息环境也不同，并且不会产生 PU 与 SU 之间的通信，不过在阴影衰落较为严重的情境下，检测效果不佳；协作检测算法：协作检测需要多台 CR 设备交换各自的感知结果，弥补了单个节点由于 PU 用户信号的阴影衰落而无法被检测从而 CR 设备在此频段通信会对 PU 产生干扰的缺点，算法融合本地的感知信息可以使 SU

获取更为全面的主用户信息，不过此算法需要中继完成转发功能，在 CR 设备位置变化较快的时候检测难度也会很大；干扰温度检测：FCC 提出了一种干扰温度模型，并给出了干扰温度界，也就是 PU 用户所能忍受的干扰大小，不过实际中无法给出确切的干扰温度，在噪声与主用户行为同时存在的情况下（绝大部分室外环境）CR 设备并无法分辨两者之间的区别，这也是该算法的缺点。

- **合作频谱感知：**合作频谱感知技术并非辅助频谱感知，由于每个认知设备独立进行频谱感知不一定可以获得完整的频谱信息，所以基于合作感知的 mac 层协议不断被提出，合作频谱感知技术意为认知用户间以某种策略将独立得到的感知结果进行分析叠加，从而尽力获得全面准确的频谱感知结果，文献<sup>[3]</sup>中提出了一种基于簇的能量采集的协同频谱感知，认知节点基于它们的接收功率水平聚集在一起，以提高感知性能，文献<sup>[4]</sup>提出的基于簇的协同频谱感知，在成簇的基础上，根据每个簇内成员的采集到的信道的方差信息优化自身的大小。文献<sup>[5]</sup>中提出了在簇成员发现某一个频谱不可用时，会立刻通过洪泛路由发送给簇内其他成员终止自身的信息传输。

#### 1.4.2 频谱决策

通过频谱感知获取到可用频带的信息后，如何根据需要的服务类型与服务质量选择最适合进行传输作业的信道，是认知自组网的重要研究内容之一，是接入控制与频谱分配的前提。非合作的本地频谱决策，最简单的方式是随机选择一个可用频谱，不对频谱的可用概率，链路质量等传输参数进行考虑，这样可以节省大量的算力，但是并不能保证通信质量。频谱决策应当考虑信道通信质量的同时考虑信道的数学统计特征，此特征根据主用户的动作进行实时改变，适合在主用户活动剧烈的条件下寻找适合的信道，这样可以尽量减少由于主用户的频繁改变导致的信道可用性差的问题，虽然一些频段的通信质量高，但是有可能主用户的活动同样强烈，这也会使得认知设备频繁执行跳频过程影响整个网络的性能，文献<sup>[6]</sup>提出了基于信道主用户活动概率的频谱决策方案，在次用户负荷较低时选择可用概率最高的信道可以有效节约系统时间。

#### 1.4.3 频谱共享

在某个认知设备的通信范围内是可能存在多个认知设备的，在这种条件下，由于自私策略，每个认知设备在感知到类似的频谱结果后，必然会优先使用某个最佳的信道，这会使得此信道由于认知设备的争夺而不再具有通信的可能性，如果这种条件下每个设备都可以与通信范围内的认知节点分享频谱感知结果，通过协商不再争夺同一个信道，这样可以有效提升信道的使用率与网络的性能，所以频谱分享对于认知设备密度高的场景十分有必要，目前的频谱共享依然分为集中式与分布式两种，文献<sup>[7]</sup>对比了两种策略，表明了集中式分享策略虽然可以达到最优，但是分布式可以使用较少的能耗。为了平衡两者之间的优缺点，目前的经典的方法就是在成簇的基础上完成频谱共享，同时具

有分布式与集中式的优势，当然也是对两者的一种妥协。

#### 1.4.4 频谱移动

认知设备在通信过程中使用的信道有可能会被主用户占用或者自身的移动导致某一个频带不再可用，此时认知设备必须中断数据的传输，这在射频设备的表现为频率的改变，在这个网络中表现为某个节点暂时丢失（时间很短），在多跳网络中，频谱切换会导致间歇性连通性，甚至是网络分区。在链路断裂之后进入其他信道重新进行组网或者重启数据传输过程，这个过程被称为频谱移动，频谱移动属于组网的基础技术，频谱移动对于射频物理层与链路层和网络层协议都提出了新的要求，所有通信层都应该保证在频谱切换的过程中对数据通信的影响最小，文献<sup>[8]</sup>设计了集中式与分布式两种频谱切换与路由设计方案，其设计的互斥算法可以在路由迁移到新的链路上是不干扰其他链路同时降低整体链路迁移的时延。

频谱切换带来的主要结果是数据传输的延时。频谱移动的主要原因来源于主用户的活动，所以制定最佳的频谱移动策略在于处理主用户的活动上，对主用户活动进行合理的建模，分析主用户的时间统计特性，从而保证频谱移动的次数尽量减少。

#### 1.4.5 路由协议

认知无线网络是电池供电的，且相对密度较大，面对不同的应用程序，认知网络的 QoS 要求也不尽相同，文献<sup>[9]</sup>中提出使用基于簇的节点收缩的簇头选择方案与基于可用概率的路由选择方案，在这种簇头选举的条件下，路由选择具有最高可用性概率的路由，即途径路由信道可用概率的乘积。在文献<sup>[10]</sup>中提出了一种基于簇的路由协议，将簇分为簇头、成员节点、中继节点和网关节点这四类节点，此路由算法中，节点不需要开机后立刻确认频谱的使用情况，而是随着时间的推移不断确定信道可用性，一组地理相邻的认知设备倾向于共享相似的可用通道集，因此较小的集群规模会增加集群中公共通道的数量，算法中根据度大小，移动特征与可用信道数目确定簇头，之后由簇头广播 RREQ 消息维护整个网络的路由，该方法使得路由协议的开销，吞吐量，延时都达到了最优。

### 1.5 论文组织结构

论文一共包括四个章节，具体安排如下：第二章对主用户以及认知用户的行为进行了建模，给出了一种从节点间的信道交汇到路由发现的组网算法，第三章通过代码实现给出仿真结果，针对仿真结果进行了分析；第四章指出了论文中的缺点与未来应该研究改善的方向。

## 第二章 认知自组网算法

分布式认知自组网算法分为三个部分：节点交会，拓扑发现与路由设计。节点交会是整个组网过程的基础，认知用户使用跳频策略完成邻居节点的交会，文中对节点交会过程的主用户，次用户行为进行了建模，并给出了基于 CGB 算法的算法仿真结果。拓扑发现则是根据分簇思想给出了发现过程，以及算法的仿真结果。路由协议针对网络最低时延与最长寿命分别进行了设计，给出了两者的仿真结果与对比分析。

### 2.1 系统建模

主用户模型需要考虑主用户到达离开模型，占用的信道；次用户行为则包括通信范围内频谱感知避让主用户，主用户与次用户在同一个信道中的模型如图 2-1 所示

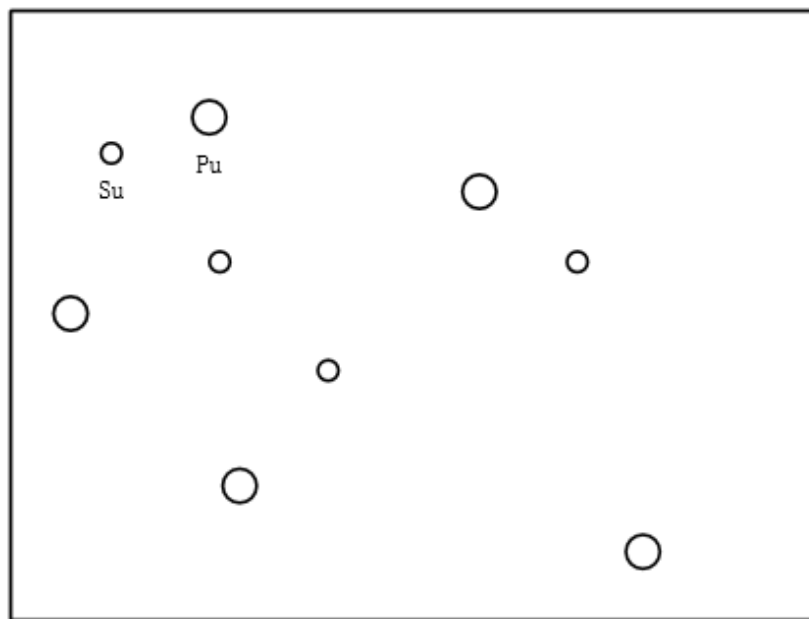


图 2-1 同一信道内模型

#### 2.1.1 主用户行为建模

在  $100 \times 100$  的空间随机分布一定数量的主用户，每个主用户占用一个频段，互相之间占用的信道不重叠，每个主用户服从到达率为  $\lambda$  离开率为  $\mu$  的泊松分布。

### 2.1.2 认知用户行为建模

在  $100 \times 100$  的空间内随机分布一定数量的认知用户，每个认知用户可以扫描自身通信范围内的主用户活动即主用户占用的频谱，并可以将可用频段信息存储在可用频段列表中，每个认知用户具有一个唯一的 macid (1, 2, 3...n)。

## 2.2 点对点节点交会算法

文中使用的是 CGB 交汇算法<sup>[11]</sup>，CGB 算法首先将空间中可用的  $N$  条信道分为多组，即  $N = C_{GROUP} \times C_{NUMBER}$ ，信道如下式所示

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{1C_{NUMBER}} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \cdots & C_{2C_{NUMBER}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{C_{GROUP}1} & C_{C_{GROUP}2} & C_{C_{GROUP}3} & \cdots & C_{C_{GROUP}C_{NUMBER}} \end{bmatrix} \quad \text{式 (2-1)}$$

每个认知用户都已概率  $P_i$  和  $1-P_i$  分别进入主跳频模式和从跳频模式，两种模式的跳频策略如下：

#### • 主跳频模式

主跳频模式中跳频序列周期性生成，每个周期包含  $N$  个时隙，为生成主跳频序列，首先需要在集合  $C$  中随机选取一个子信道集合  $C_m$  作为新的集合的第一个元素，生成一个经过循环移位的新的信道集合  $M'_A = \{C_m, C_{m+1}, \dots, C_{n-2}, C_{C_{GROUP}-1}\}$  然后按照子信道集合的顺序，分别从每个子信道集合中抽取一个空闲信道  $c_{i_m}^{(m)}$ ，构成一个序列集合：

$$M_A = \{c_{i_m}^{(m)}, c_{i_{m+1}}^{(m+1)}, \dots, c_{i_{n-2}}^{(n-2)}, c_{i_{n-1}}^{(n-1)}\} \quad \text{式 (2-2)}$$

主跳频序列的  $M'_A$  在  $N$  个周期中并不会发生改变，只是在大周期中不断改变  $M_A$ 。主跳频序列产生后会出现长度为  $C_{GROUP} \times C_{NUMBER}$  的序列，其中每个跳频元素将会重复  $C_{NUMBER}$  次，详细的实现方法如图 2-2。

#### • 从跳频模式

从跳频模式与主调频模式相似，首先需要在集合  $C$  中随机选取一个子信道集合  $C_m$  作为新的集合的第一个元素，生成一个经过循环移位的新的信道集合  $M'_B = \{C_m, C_{m+1}, \dots, C_{n-2}, C_{C_{GROUP}-1}\}$ ，但是并不要求两者的  $C_m$  相同，而且只需要进行一次随机数的选举，之后按照顺序将选中的子信道集合中的元素排列进跳频序列即可。跳频模式的算法流程如图 2-2。

#### • 运行实例

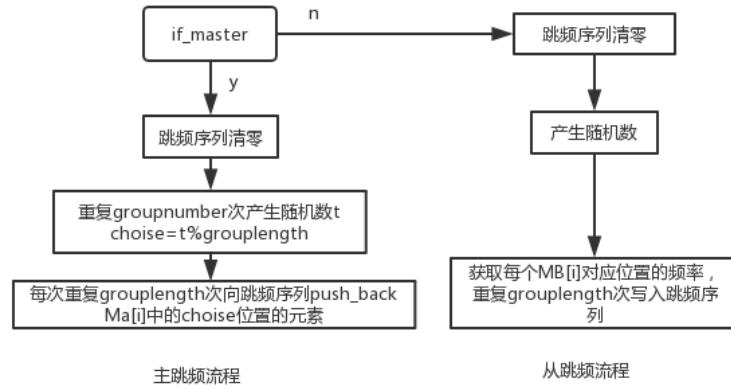


图 2-2 主跳频算法

下面介绍程序代码中的实例实现 GROUP\_NUMBER=27, GROUP\_LENGTH=6, 在此条件下举例说明运行过程, 假设信道分组

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\
 C_2 &= \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \\
 C_3 &= \{13, 14, 15, 16, 17, 18\} \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{2-3}$$

假设此时生成的主跳频序列

$$M_A = \{2, 10, 13, \dots\} \tag{2-4}$$

生成的次跳频序列

$$M_B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 1, 2, 3, 4, \dots\} \tag{2-5}$$

主跳频序列每隔 6 次进行一次跳频, 从跳频模式下则会每个时隙进行一次跳频, 代码实现中时隙为小循环, 两种模式下的交会如图 2-3 所示。当两个节点分别进入主跳频模式与从跳频模式, 在节点时间同步的基础上, 由于主跳频序列包括所有子信道集合中的一个频率, 即  $C_{GROUP}$  个频率点, 而从跳频序列会包含某一个子信道集合中的所有元素, 即  $C_{NUMBER}$  个频率点, 在同步的条件下, 必然可以在  $N$  个时隙 (小循环) 中完成, 在异步的条件下, 则需要  $2N$  个时隙 (小循环), 因此 CGB 算法属于有界算法, 其 MTTR 为  $2N$ , 在代码实现时也选择设为  $2N$  个循环进行节点交会。



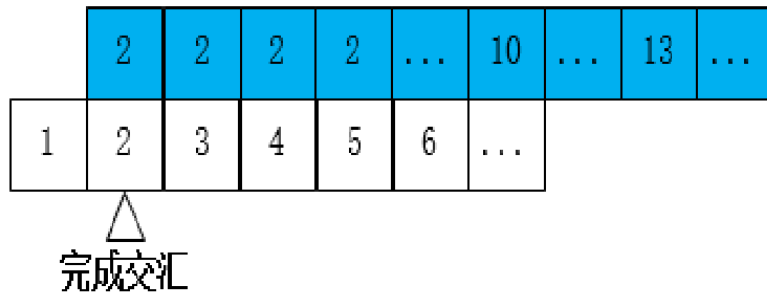


图 2-3 交汇过程

## 2.3 拓扑发现过程

拓扑发现过程是节点完成通信范围内的节点交会过程之后进行的操作，为了保证每个节点都加入拓扑，需要让每个节点至少拥有一个邻居节点，所以程序运行时如果出现通信范围内没有邻居节点时，组网必然无法包含所有点数，所以所有节点会重新进行随机位置算法。此拓扑发现算法基于成簇的拓扑发现，由于纯分布式网络拓扑发现过程中每个节点都需要得到完备的拓扑信息才能确定网络位置，维护成本随着节点数目增多而增加，所以选用不完全分布式组网方法，选择成簇算法可以减少网络的维护开销，只需要簇头承担拓扑维护工作以及数据转发工作，减轻了网络带宽的消耗。每个簇包含簇头（根节点 R），一层叶子节点（L），二层叶子节点（E），多层节点（F,G...），可连通的簇间会存在网关节点（N）。拓扑发现算法最终可以将散落在  $100 \times 100$  内一定数目的认知设备连接成图，形成多个簇组成的完整的拓扑，整个拓扑发现算法需要以底层节点交会为基础，所以下面将会分别介绍拓扑发现的几个过程。

### 2.3.1 用户初始化

用户初始化过程会对主用户以及认知设备设定地理位置，分配主用户占用的频带，清空用户的路由表，子节点，父节点，信道可用列表等数据。认知设备具有完备的频谱感知功能，可以完整的感知到通信范围内的主用户占用的频率同时建立自身的可用信道列表，列表格式如 2-4：列表使用 vector 二维向量进行保存，自向量首位存储信道频率，第二位存储累积可用概率，第三位存储当前可用情况，每次进行频谱感知都会得到当前使用频谱是否存在主用户或者次用户数据活动，并将可用信道结果写入信道列表中，如果出现所有信道都被占用，则需要等待一个检测周期不做组网动作，在此之后重新进行频谱感知。频谱感知在算法中使用的是简单的对于主用户能量检测算法，对每个信道进行检测，每次检测都会获取范围内的主用户的 *get\_exist* 函数结果，此时主用户将会根据到达离开模型给出存在结果返回给此函数，认知设备根据主用户占用的信道获得自身

Vector<vector<float> > channel

channel1	S1	S2
channe2	S1	S2
...	...	...

图 2-4 信道列表

的可用信道列表，此算法要求每个节点每次进入拓扑发现循环都会执行一次。

### 2.3.2 节点交会

由于节点交会时拓扑发现的基础，所以拓扑发现过程需要与节点交会相连接，而且拓扑发现的性能会对节点交汇过程产生一定的要求。文中使用的节点交会算法基于CGB算法，代码实现过程如下：根据 2-2 为每个 CR 设备产生主跳频序列或者从跳频序列，每个认知节点都有相同的概率  $P$  和  $1 - P$  进入两种跳频模式，在通信范围内的两个节点分别进入两种模式中，则会发生信道交汇，如果进入同一种模式则很大可能无法检测，成功交汇概率即选择不同模式的概率： $P_i = 1 - P^2 - (1 - P)^2$ ，以跳频序列为基础，两个设备进入不同的跳频模式，主跳频用户进行如下操作：在所有的可用频段广播寻找帧，如果收到回复则成功在某一信道完成交会，此时设备会交换可用信道列表，并对比选择一条  $S1_i \times 0.5 + S1_j \times 0.5$  取值最大的频段作为通信信道，此时的频谱决策应当以最大连通的统计特征作为参考，同时此频段为了避免干扰将会被其他认知用户感知到正在活动，这样就完成了频谱共享与频谱决策工作；从跳频用户需要在所有的可用信道监听广播寻找帧，如果接收到主跳频用户活动则同样进行频谱共享与频谱决策。

节点交会阶段的耗时决定了拓扑的完整性，由于并非是所有节点间都能恰好处于主跳频与从跳频同时存在的状态，所以一次的结果并不能代表正确结果，整个阶段应当进行循环检测以求尽力得到完整信息。

### 2.3.3 成簇

本文使用的是成簇算法，为了确定簇的结构，需要为每个簇确定簇头以及簇内成员。在此处使用获得最大连通性的簇头的选举方法。成簇后模型图如图 2-5 所示：

在初始化阶段，每个节点的节点状态 (R,L,E...) 都将会被初始化为 R，即簇头节点，不过子节点数目初始化为 0。进入簇头的选举阶段后应当开始向邻居节点发送簇头选举帧，帧结构如下：收到帧后每个认知用户  $i$  将会进行如下判断操作：

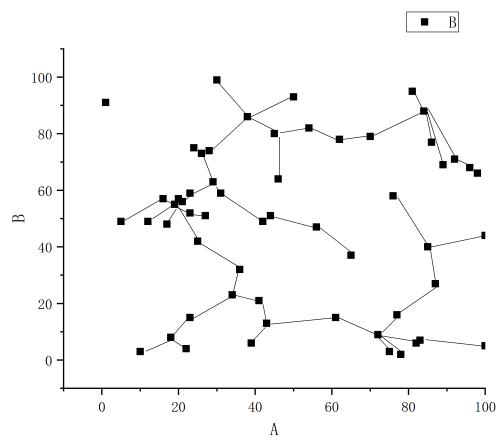


图 2-5 成簇联通结果

SU[i].macid	SU[i].sonnode.size()	SU[i].ROOTsituation
节点地址	子节点数目	节点状态

图 2-6 簇头选举帧

- $SU[i].rootsituation == SU[j].rootsituation == 'R'$

两个根节点相遇，则需要对子节点数目进行判断：

- $SU[i].sonnode.size() \leq SU[j].sonnode.size()$

节点  $i$  的子节点数目如果小于等于节点  $j$  的子节点数目，将  $i$  的节点状态设置为 L 叶子节点， $i$  的子节点状态设置为 E 第二层叶子节点，重复执行以确定节点所位于的叶子层数，同时把  $i$  的父节点设置为  $j$ ， $j$  的节点状态依然保持 R 即根节点状态，节点  $i$  将节点  $j$  加入到自身的子节点列表中。

- $SU[i].sonnode.size() \geq SU[j].sonnode.size()$

节点  $i$  的子节点数目大于  $j$  的子节点数目，此时  $j$  的节点状态更换为 L， $j$  的子节点变为 E，重复执行同上， $j$  节点把  $i$  节点设置为父节点，同时节点  $i$  将会把  $j$  加入自身的子节点向量中。

- $SU[i].rootsituation == 'R' \&\& SU[j].rootsituation != 'R'$

根节点与非根节点相遇，节点  $i$  直接将  $j$  加入子节点， $j$  的节点状态设置为 L，并确定  $j$  的子节点的节点状态， $j$  将  $i$  设置为父节点。

- $SU[i].rootsituation != 'R'$

由于自身为非根节点，与其他非根节点相遇不做任何操作。

此阶段结束后会产生不同的节点状态以及多个簇，此时由于在簇头选举过程中节点可能多次更换父节点，但是却不能确定是到达簇头的最短状态，而且此时并不存在网关节点  $N$ ，所以需要进行其他过程来确定最短到簇头状态以及网关节点。当此状态结束后，所有的子节点逐级上传信道列表的信息，由簇头选择簇内通信应该使用的信道，所有的簇头节点需要进入主跳频模式发送寻找帧，如果此时新接入节点接收到寻找帧可以直接作为 L 状态进入下一过程，如果新接入节点在  $2N$  时隙之后依然没有接收到簇头的消息则作为 R 状态直接进入下一个过程。

### 2.3.4 最短拓扑发现

由于在成簇阶段的簇头选举过程不能获得最佳拓扑，所以需要在现成的簇的基础上选择节点的最佳状态。此过程需要所有的簇头节点向子节点列表中的所有子节点广播消息，帧格式如下：

表 2-1 广播帧

$su[ROOT].macid$	$su[Last].macid$	$T$
广播节点 macid	上一跳节点 macid	跳数

当节点  $i$  收到广播帧后，将会做如 2-7 处理：

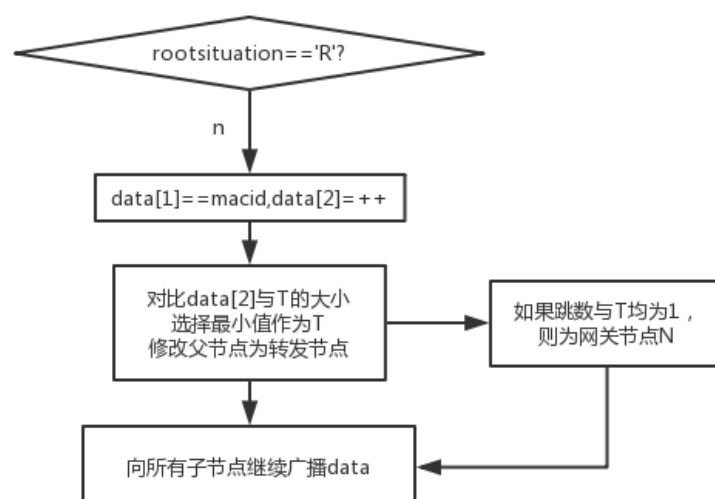


图 2-7 处理广播消息帧

每个节点都会产生一个层数值，与节点状态的对应关系为  $R \rightarrow 0$ ,  $L \rightarrow 1, \dots$ ，接收到广播帧后，如果自身状态为簇头，则不做任何处理，如果帧中的跳数低于自身的层数  $T$ ，说明有一条更短的到达其他簇头的路径，此时应当把该簇头作为自己记录的簇头节点并与之交换频谱消息，并将转发节点设置为父节点，如果收到两个簇头的消息，证明此节点与两个簇头相连，则节点状态修改为网关节点  $N$ ，之后继续进行转发。

此过程完成后整个拓扑发现过程就已经完成，此时网络中将会出现网关节点，网关节点负责两个簇之间的通信需求，簇头负责维护整个簇的信道状况，每个簇头节点将会周期性发送寻找帧，以便新加入节点可以直接加入网络，每层叶子节点周期性向簇头节点汇报可用信道消息，以便在一个主用户产生时候将所有簇内节点离开此频段发送消息。发生拓扑断裂的情况分三种：

- 可用频率断裂。如果簇头节点在当前频段的通信断裂，但是其他簇内成员不会受到影响，此时其他簇内成员需要进入成簇阶段，此时可以直接选举新的簇头，为了通信的需求不能等待簇头的重新连接，而应该尽快建立新的簇完成通信；如果其它层节点出现断裂，则影响较小，由于在频谱共享阶段存储了邻居节点的可用信道，所以可以选择可用概率次大的频率点监听，如果子节点数目不为 0，会在次大概率信道发送寻找帧，而其父节点检测到子节点消失会在次大频率内发送寻找帧，如果重连成功则可直接加入原来拓扑并重新选举簇内的通信频率，一段时间后无法重连则再次进入成簇阶段，初始化自身通信参数。
- 能量耗尽。簇头节点能量必然是最先耗尽的，这也会导致网络的平均寿命不长，这个问题将会在下一章进行讨论。叶子节点能量耗尽会直接退出拓扑，其子节点与父节点依然同可用频率断裂进行处理。

- 超过通信范围断裂。算法中由于认知节点初始化之后不会再次发生位置移动，所以这部分并未出现在代码中，提出的想法是即使超过通信范围，也应该尝试在次大频率内等待重连一段时间，如果重新进入了簇的通信范围那么可以直接加入，如果再也不回到原始簇范围，将会重新回归成簇阶段，在新的通范围内建立通信。

## 2.4 路由算法

目前无线网络大多是由 Ad Hoc 路由算法发展而来，主要分为三类：按需路由协议，先验式路由协议，混合式路由协议，路由协议应该考虑的因素有公平性，时延，吞吐量，开销等。本文中的路由算法是在拓扑发现阶段已经完成的情况下进行的，路由设计的优先考虑因素应当是时延，对于时延，在认知无线电中应该考虑跳频时延，这在簇间通信中出现，所以在经过网关节点 N 的时候应当考虑跳频时延，其次则是地理位置所决定的节点距离产生的传输时延，对于处理时延，由于帧长一定，所以每个节点的处理时延大致相同，可以不予考虑。下面对于不同的网络需求给出了按需路由协议与先验路由协议的算法。

### 2.4.1 按需路由协议

按需路由协议，顾名思义是在节点需要进行通信的情况下申请路由通路，发起路由寻找协议，在寻找到路由协议之后进行数据传输，也仅仅在数据传输过程中进行路由的维护，在通信结束之后不再进行路由的发现与维护，按需路由协议 DSR{*Dynamic Source Routing*} 是最早应用按需路由协议的，所以文中使用的按需路由协议仿照 DSR 协议进行了设计。在这种方法中，每个节点都会维护自身的路由表，路由表中存储着到达不同节点的路由信息，路由表组织与实际运行结果如图 2-8 与 2-9 所示。

Vector<Vector<int> >routinglist

目的地址	跳数	时延	路由消息
...	...	...	...

图 2-8 路由表

在节点需要通信时，会发起路由寻找，路由寻找帧的设计如下：为了区别网络中传送的路由帧，需要对帧类型进行区分，路由寻找帧 type=0。文中使用的路由属于洪泛式路由，当某个节点发起路由寻找的时候，将会向自身的子节点以及父节点发送此路由帧，节点收到路由帧之后将会进行如下处理：

1	图是连通图									
6	4	405	33	23	14	0	1	6		
6	5	557	33	23	14	0	1	11	6	
6	6	1133	33	23	14	0	1	15	42	6
6	6	1097	33	23	14	10	40	15	42	6
6	6	1253	33	23	14	10	59	15	42	6
6	6	1517	33	23	14	0	1	15	56	6
6	6	1481	33	23	14	10	40	15	56	6
6	6	1637	33	23	14	10	59	15	56	6
1	33	23	14	0	1	6				
6	收到data1包									

图 2-9 路由表

Vector<int> REQ						
Type	源地址	目的地址	跳数	时延	上一跳地址	路由消息

图 2-10 路由寻找

- 当自身不为目的节点时，不会把路由写入自身的路由表，自身的 macid 写入到帧最后的路由表中，帧中的跳数加 1，根据上一跳的地址增加传播时延，如果自身状态值为 N，则需要增加跳频时延（50），根据上一跳中保存的地址，计算出距离加成，为了对信道的统计特征进行计算，应当在传输时延基础上乘以一个与信道可用概率相关的系数，这样可以表现出认知无线电中信道中间的区别，使用概率越高时延应当越小，所以文中取了  $k \times \frac{1}{p}$ 。
- 当自身即为目的节点时，则会将收到的帧中的跳数，时延，源地址，路由消息录入自身的路由表中，同时向源节点按照最少跳数路由发送 ACK 帧，ACK 帧只是在 REQ 帧的基础上增加了路由表的消息，在源节点收到该 ACK 消息后将会把路由消息进行处理后存入自身的路由表中。

由于网络的每个节点在数据传输过程中消耗的能量不同，所以传输过程中会出现节点死亡的状况，如果只保留最短路径的路由，很有可能在数据传输的过程中发生断裂，所以需要记录多条路由消息以尽力完成信息的传输。每次路由表的写入过程将会将此路由消息与当前路由表进行对比，如果产生重复将更新时延消息后不再重复写入。

为了维护路由，在数据帧传送前需要对当前使用的路由进行能量统计，尽量少的收到其他节点回复的能量耗尽错误，此过程也是路由维护过程，在路由维护过程中将不会再次对路由通路的性能进行重新计算，只对最少能量节点的能量进行估计，估计可以连续传送的数据帧的数量。

### 2.4.2 先验路由协议

先验式路由协议需要每个节点都保存一张到达同一个网络中其他节点的路由消息表格，不同与按需路由，每当节点需要发送数据包的时候只需要直接在路由表查找现成的路由即可。在文中的实现方案是每隔一个周期进行一次查找作为路由维护过程，而不考虑是否需要进行通信，在需要通信的时候直接发送数据帧，不再执行路由发现过程。

两种路由协议使用的路由发现帧与 ACK 帧相同，很明显两者对应的业务不同，路由协议的开销也不同，下一章节则对两者的不同环境下的性能进行了仿真分析。

## 2.5 数据传送

数据发送是在路由建立成功的基础上进行的，数据传送的性能主要考虑的因素就是收发时延，在不考虑网络寿命的条件下，所有节点都应使用最小时延的信道进行数据的传输，这样可以获得最好的效果。但是网络的容量有限，所有数据包都使用最短路由，必将会使得路径的节点带宽占用率过高，不利于网络的维护与延长网络的寿命，所以对于不同的业务类型，应当进行不同的处理，文中主要是对于最低时延数据包和最长网络寿命对数据包的路由选择进行了选择。每种数据包的帧构造相同，构造如下 2-11：

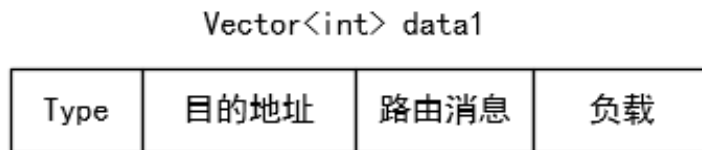


图 2-11 数据帧结构

数据包分为以下两种：

- 对时延要求高的业务，对应的 `type=1`。在路由选择时应当选择最短时延路径，只需要在当前路由表中对比所有到达目的节点的路由，寻找到其中时延最短的节点，不考虑其能量的剩余，路径上的节点收到该数据包的时候，如果自身能量不足以进行下一步转发，则会沿着路径回馈能量不足以转发消息的错误，源节点接收到之后会在路由表中删除当前最短时延通路，之后重新执行最小时延路由选择，重复进行发送，由于路由维护只能估计可以发送数据包的数量，所以如果当前的路由都不再具有转发条件，就会重新寻找路由。
- 对时延要求低的业务，其 `type=2`。此类型的业务对于时延要求不高，可以不再按照最低时延方案进行寻找，而可以为了获得最长的网络寿命，尽力不耗尽路由上某个节点的能量，所有路由的死亡时间尽量相同。在进行路由选择前，会沿着所有路由向目的节点发送一条能量查询帧，获取每个节点的能量并写入能量路由表



的对应位置，此过程收集完一条可用路径的全部节点能量信息后，如果该条路由支持数据传送，就会直接按照此条通路进行一次数据通信，当所有的节点信息统计结束后，会把路由表中的每个路由条目中节点最低的节点作为该条路由的能量，在进行路由选择的时候，直接对比路由条目的能量，选取其中的最大者进行数据传输。路由表某个条目最低能量为 1 的时候，说明该条路由表不再可用，舍弃该条路由表。

## 第三章 仿真结果分析

本课题的一个主要内容是组网算法的代码实现，课题中使用了本课教学中使用的 C++ 语言与 VS2015 编程环境，由于没有现有的认知无线电设计软件，所以需要自己从新编写组网的全过程来达到目的，毕业设计的实现与分析都需要以此环境为基础，在确定了设计思路之后，毕设的剩余内容都转移到了代码编写与调试阶段，期间也曾尝试过 NS3 仿真软件，不过由于认知无线电并不具备工具包，需要依托于 wifi 协议进行修改，不适合自定义协议的分析，所以选用自己造轮子的方法进行尝试。算法的实现思想以及过程如上章的描述，主要分为节点初始化，节点交会，成簇，更改拓扑，路由发现，为了满足组网不同的过程的需求，需要建立类（class）SU 进行认知用户的行为模拟，建立类 PU 对主用户行为进行模拟。组网过程中除去特征值计算方法都需要自行设计合适的可用方案。

仿真过程中，对于未给出的参量都使用默认值

表 3-1 默认参数

认知用户数目	70
主用户数目	55
通信半径	35
离开到达率	0.2
时延系数	1
最大跳数	5

### 3.1 组网时间

组网时间主要由节点交会，成簇阶段用时有关，节点交会过程中，每次进入主跳频模式和从跳频模式都会进行  $2N$  个循环，而可用信道的变化，也会直接导致认知设备在跳频模式中的交会时间，所以通信半径，主用户数目，主用户到达离开频率，认知设备数目都会对拓扑组网时间产生影响，所以下面分别对三种变量进行了仿真，分析了平均组网时间（CGB 循环执行次数）。

#### 3.1.1 通信半径的影响

图 3-1 中给出了通信半径对组网时间的影响，由于半径的增加，每个认知节点将会监测更多的主用户活动引起可用频段的减少，同时需要进行交汇的节点数也会增多，这会直接导致交会时间的延长，所以整个组网的时间也会延长，根据仿真也可以确定，随着通信半径的增加，组网时间将会不断延长。

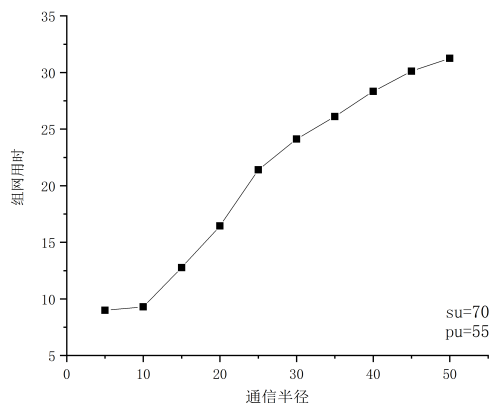


图 3-1 通信半径对组网时间的影响

### 3.1.2 认知设备数目与主用户数目的影响

认知设备数目的增加会直接引起节点密度的增加,在通信范围一定的情况下每个认知设备将会与更多的节点进行交会,分析如上,主要受到影响的依然是在节点交会阶段的耗时。主用户的影响主要体现在对频率的占用情况上,由于每个主用户都会占用一个不同的频段,这直接会导致认知设备可用信道的减少,当主用户节点数目占据了所有的信道分组之后所有节点都会无法进行通信,组网时间将无限延长。图中所示即为认知设备与主用户数目对于组网时间的影响,图中可知,认知设备与主用户数目的增多,的确会增加组网消耗的时间。

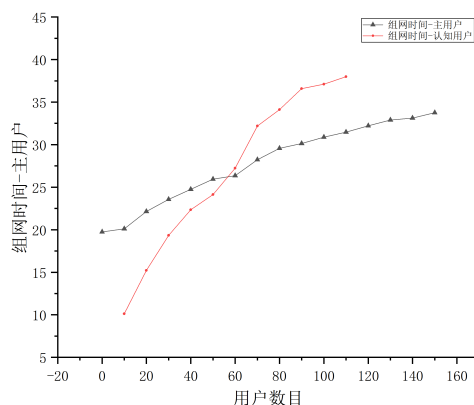


图 3-2 用户数目对组网时间的影响

### 3.1.3 主用户变化概率的影响

在仿真中,每个主用户都是具有到达离开模型的,而其中的到达率与离开率直接决定了主用户变化的频率,如果主用户一直不变化,那么认知设备可以更好地在稳定的可用信道上完成交汇,而随着主用户变化频率的增多,必将使得信道的可用概率变化更为

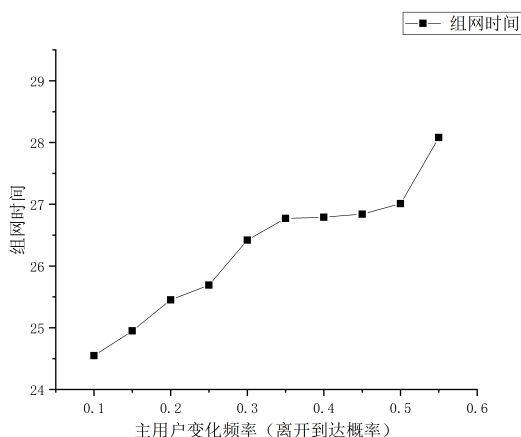


图 3-3 主用户变化概率对组网时间的影响

突出, 这也会延长组网时间, 其仿真结果如图所示, 根据图 3-3 中所示我们可以发现, 在主用户变化频率低的时候, 组网消耗的时间很短, 而随着变化频率的增加, 信道可用性变差, 也使得组网时间不断延长。

### 3.2 组网成功率

根据数据结构课程内容可知, 一个无向图的连通性可以利用它的邻接矩阵特性进行评定, 我们在代码实现过程中, 建立所有节点的邻接矩阵, 根据自身的子节点向量与父节点, 建立矩阵 L:

$$L[i][j] = L[j][i] = \begin{cases} 1 & \text{if}(SU[i].fathernode == SU[j] \text{ or } SU[j] \in SU[i].sonnode) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式 (3-1)

要判断一个无向图是否是连通图, 可以对图做深度遍历 (DFS)<sup>[12]</sup>, 遍历即从图的某个初始节点开始, 对图中的每个节点进行访问, 每个节点访问且仅访问一次。深度遍历步骤如下:

- 指定某个节点作为初始节点
- 若当前的访问节点的某个邻接节点未被访问, 则开始对其深度遍历, 若邻接节点都被访问则退回最近访问的节点, 直到所有节点都被访问
- 若某个节点未被访问, 重新选择某个节点进行深度遍历。

其伪代码如下

```

1  count=0
2  for 0 to CR_NUMBER
3    for 0 to CR_NUMBER
4      if L[i][j]&&!known(j)
```

```

5   known[j]=1
6   DFS(j)
7   count++

```

如果节点密度不一致,不同区域分布的节点数相差较大,如果通信半径较小,则会产生不相交的簇,簇之间不拥有任何网关节点,因此簇之间不再具有通信的可能性,而解决这个问题的首要办法就是平均节点的分布或者提高网络的通信半径,理论上通信半径越高,可以获得的节点消息越完整,越不容易出现孤立的节点或簇。图 3-4 给出了通信半径对组网成功率的影响(由于在  $R < 15$  时多次出现节点无邻居的情况,成功率很低,所以从 15 开始进行对比),图中可知上述理论是正确的,随着通信半径的提高,出现孤立节点的次数减少,更容易获得连通图,但是在通信半径高于 35 以后,成功率将会出现些许的下降,这是因为随着通信半径的增加,成簇的数目将会减少,而每个通信簇内的节点数目将会增多,所以平均到每个簇内会有更多的主用户占用信道,组网成功率就会有所下降。

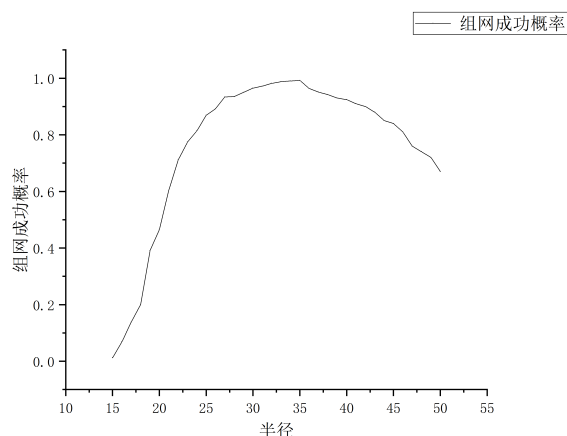


图 3-4 通信半径对组网成功率的影响

认知节点数目决定了整个范围内部的整体密度水平,也就是在通信范围不变的情况下也会影响组网成功率,认知节点数目越多,通信范围内可以连通的点越多,越不容易得到孤立的簇或者节点,认知节点数目过多的时候,会使得每个簇占用的空间区域较大,可以使用的信道数目变少,使得节点交会变得困难,所以组网成功率会不断下降,图 3-5 给出了不同的节点数目对于组网成功率的影响。

### 3.3 网络健壮性

评价网络的好坏不仅仅只有连通性,还有网络的健壮性,当节点间的通路越多的时候,整个网络的连通性越强,根据图论的知识,可以根据一个图的 *Laplacian* 矩阵的次小特征值判断图的连通性, *Laplacian* 矩阵特征值的性质:最小特征值为 0,特征值中 0 的个数即连通子图的个数,第二特征值越大,代数连通度越高,图的健壮性越好,代码

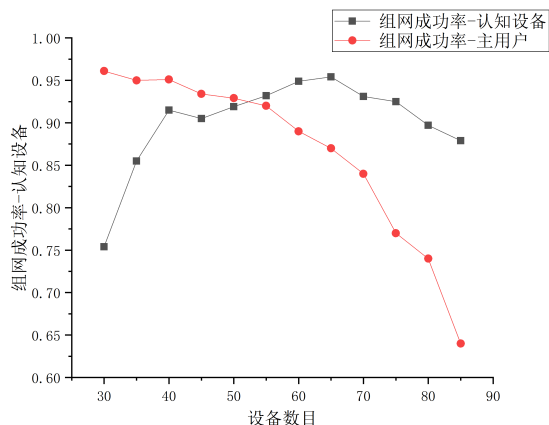


图 3-5 节点数目对组网成功率的影响

实现过程中参考了 QR 分解法求解特征值  $Matrix_{EigenValue}$ 。Laplacian 矩阵的定义为  $L = D - W$ ， $W$  为上述的邻接矩阵， $D$  为度矩阵，度矩阵即

$$D[i][j] = \begin{cases} \sum_{m=0}^{CR_{Number}-1} W[m][j] & if(i == j) \\ -1 & else \end{cases} \quad \text{式 (3-2)}$$

文中的认知网络由分簇的模型构成，不同簇之间可能拥有不同数目的网关节点，每个簇之间的网关节点越多，簇内的叶子层数越少，整个网络的健壮性越高，图 3-6 中给出了不同认知数目与主用户数目下对网络健壮性的影响以及通信半径 (3-7) 对网络健壮性的影响。

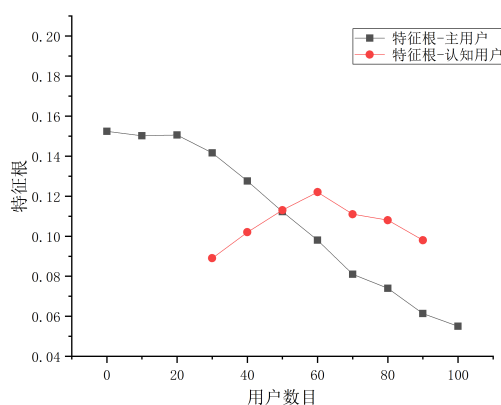


图 3-6 节点数目对网络健壮性的影响

图中可知，主用户作为干扰因素，其数量越多，组网后网络的健壮性越低，认知用户作为通信节点，初始阶段会因为节点数的增加使得整个网络的簇更容易相连，出现多个连通子图的情况减少，在认知节点不断增多后，网络健壮性又会下降，认知节点增多

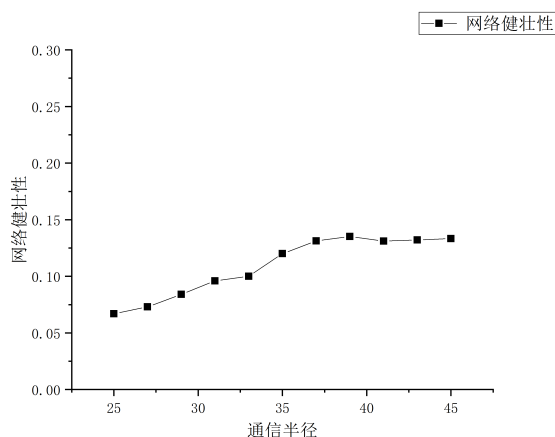


图 3-7 通信半径对网络健壮性的影响

会使得子簇的深度加深，虽然也会增加网关节点的数目，但是深度影响增加还是使得网络的健壮性下降，不同节点之间点点连通的概率下降，而通信半径也会增加网络的健壮性，减少子图出现概率，在增加到一定数值之后不再对健壮性产生过大影响，甚至使健壮性略微下降，这种情况与信道减少以及深度增加相关。

## 3.4 路由与数据传送性能

### 3.4.1 可用路由数目

可用路由条目的数目是保证数据能够成功发送的根本，在分簇网络中，节点间通信的最远方式为：簇内成员 → 簇头 → 网关节点 → … 簇头 → 簇内成员，由于分簇网络作为多跳网络，节点间的通信需要借助多个簇头与网关节点，而路由条目的数目保证了在某个簇头或者网关节点死亡的条件依然可以选择其他通路进行通信。

文中使用的路由寻找方法属于洪泛式路由，在路由寻找过程中一个比较严重的问题就是网络中将会出现过多的路由寻找数据包，这要求必须对每个路由寻找帧的寿命进行限制，以免在真实应用场景中造成网络拥塞，所以对于这个问题下面给出了路由寿命（路由寻找帧的跳数上限）与可用路由数目的关系，选择合适的网络路由寿命有利于整个网络的运行。路由寻找的过程，跳数越多，可以获得的路由将会越多，但是也会延长网络的整体路由发现时间，并且真实无线网络中多跳路由的生存类似于通信网课程中的生灭过程<sup>[13]</sup>，其过程的状态转移图如图 3-8 所示

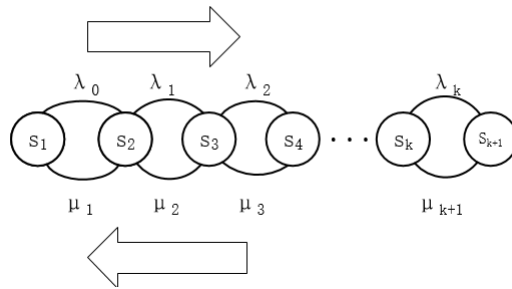


图 3-8 路由状态转移表

令  $\theta_0 = 1$ ,  $\theta_k = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_{k-1}}{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \cdots \mu_k}$ , 其中每个状态的  $P_k = \theta_k P_0$ , 代表路由条目中簇头正常工作的数目。稳态分布下  $P_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \theta_k\right)^{-1}$ , 所以随着路由条目中经过的节点的数目增加将会同时增加路由条目失效的风险, 因此在实际应用场景中对于跳数以及路由失效风险应该进行权衡的选择。

仿真中给出了不同跳数下可以获得的路由条目数目以及程序运行的平均时间 (c++ 中利用 clock tick 表示) 的关系图 3-9, 由于在  $T > 6$  之后程序运行时间实在过长, 所以随机选取了两个节点作为通信双方, 并对他们的路由过程进行了平均计算, 为了便于观察, 对 clock tick 进行了取对数后缩倍处理, 据此来观察路由协议的收敛时间, 由于计算机模拟在超过 8 跳之后即使是两个节点采平均数的时间也是十分漫长, 所以只观察 8 跳之前的路由状况。根据仿真结果中可知, 整体网络的路由过程运行时间与最大跳数成

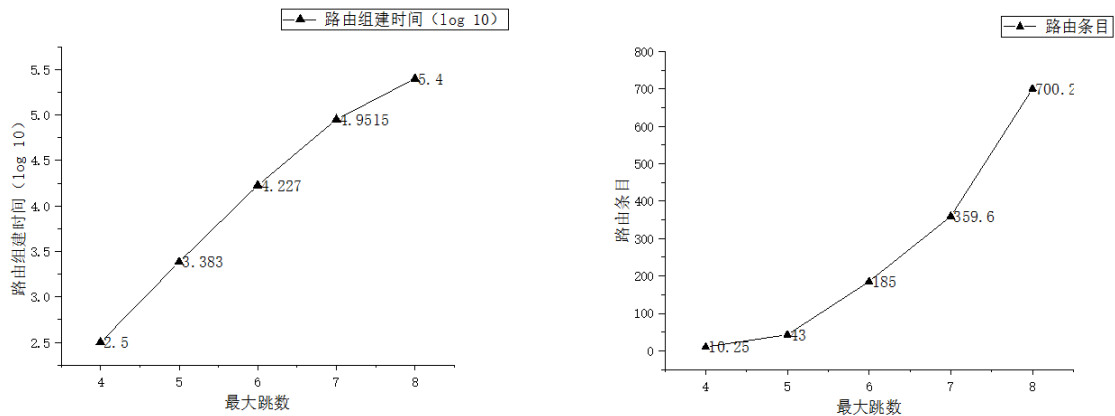


图 3-9 跳数与路由性能的关系

正比关系, 且随着跳数增长, 消耗的时间也会呈现指数型增长趋势, 而路由条目同样也与最大跳数的幂函数成正比, 这是因为跳数的增加意味着可以经过的簇头数目与网关节点数目增加, 而并非简单地加法, 是与簇头及网关节点的次幂函数相关。图中我们也可发现, 这两者的优势不能同时具备, 要向获得更多的路由条目意味需要消耗更多的组网时间。

分簇网络中的路由与分簇数目有着密切的关系, 由于节点通信过程中会使用簇头和网关节点作为中间跳点, 所以成簇的个数一定程度上影响了路由的跳数以及路由的



可靠性，在文中成簇的个数主要受通信范围以及认知设备的密度（数目）的影响，下图 3-10 以及图 3-11 中给出了路由条目的数目与通信半径和认知节点数目的关系以及两者与成簇数目的关系，考虑到通信半径过大时组网成功率将会到达最大概率后降低，所以只考虑单调增区段的通信半径与路由数目的关系。图中可知，随着认知节点的增加，

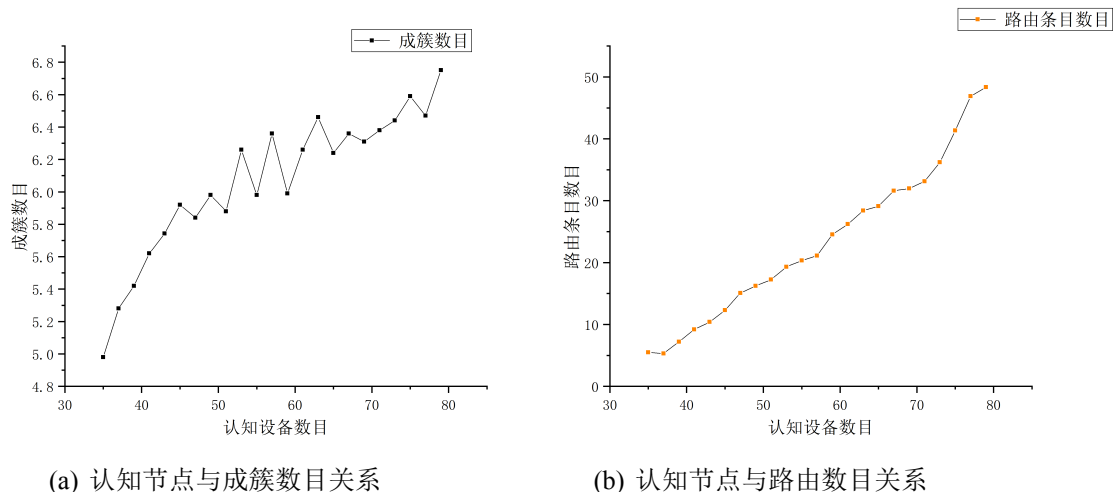


图 3-10 认知节点数目对路由的影响

整个成簇的数量增加，而路由条目数目也随着认知节点数目增加而增加，证明网关节点的增多，产生了更多的路由条目，而通信半径的增加也同样增加了网关节点的数目，虽然网络健壮性下降但是路由数目却不断增加。

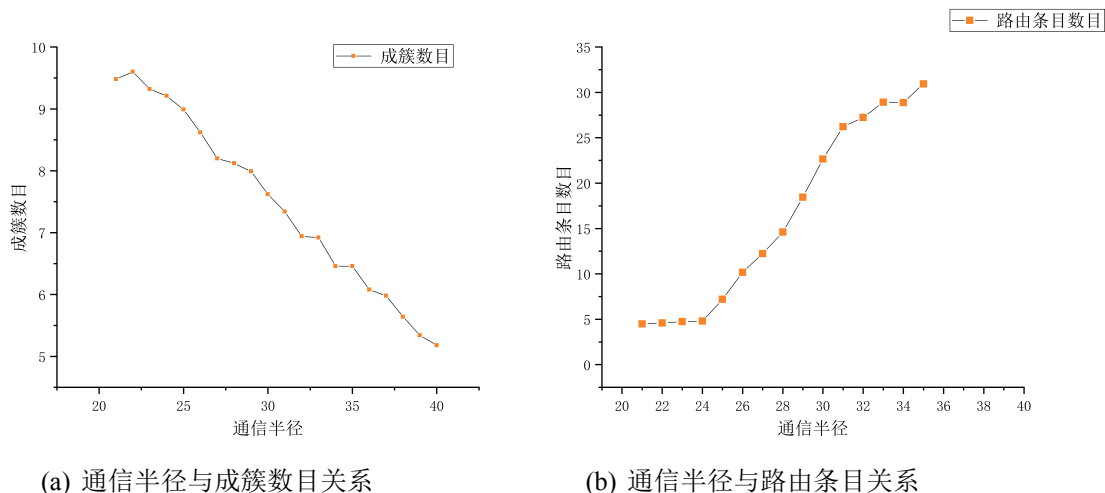


图 3-11 通信半径对路由的影响

### 3.4.2 网络平均寿命

文中给出了两种路由策略，一种先验式路由协议，一种按需路由协议，这两种路由策略的应用场景有所区别，在数据传送活动较少的区域，按需路由协议理因为其实时性

的特点，应当有着更加优秀的能耗，在数据传送活动较多的区域，先验式路由协议可以节省大量路由数据包，从而获得更佳的能耗比。图 3-12 中给出了不同数据活动比（活动时间占总系统运行时间的比例）下的两种路由模式的能耗比例。由图可知，按需路由

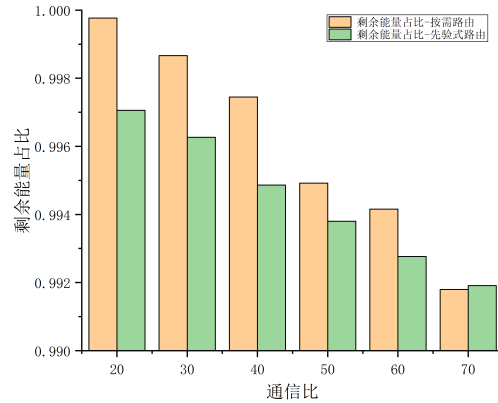


图 3-12 路由类型与剩余能量比例

协议在进行少量通信的时候可以节省更多能量，大于 70 的活动时间比时能耗将会高于先验路由协议，所以在数据活动剧烈的区域应当优先使用先验式路由协议，相反则优先使用按需路由协议。

### 3.4.3 传送数据类型

对于网络中不同的数据类型要求，适当的路由选择方式可以有效延长整个网络的节点运行时间。所以给出了两种数据包类型，一种低时延数据包和一种最长网络寿命数据包。低时延数据包由于会长时间使用最短时延线路，将会先出现死亡节点，通过观察第一个死亡节点的出现时间，可以估计整个网络的寿命，所以代码实现中，会对所有节点初始能量设置为随机数。图 3-13 中给出了首次出现节点死亡的时间对比。

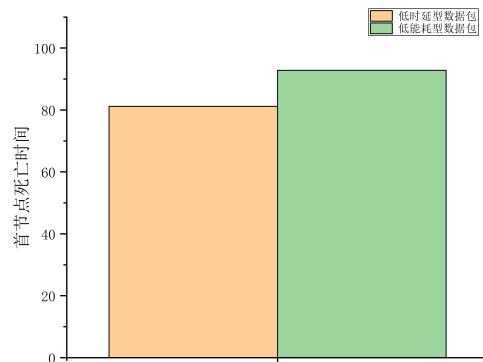


图 3-13 数据包类型与首节点死亡时间对比

图中可以看出,使用第二种路由方案可以有效延长首个节点死亡时间,同理可以增加整个网络的平均寿命,但是这是以不能取得最短时延作为代价的,在真正的网络中,每个节点都是自私的,不会有设备愿意承担超过发送自身需要的数据之外的功能,因为这会导致自身的能量优先消耗完,所以对于大量数据要进行传输,同时时延要求不高,建议优先使用最长寿命的路由方案,减少对其他设备的负担同时增加网络的流量。

### 3.5 拓扑发现的另一种方案

当我们把延长网络寿命的任务不仅仅放置在路由协议的设计上,而同时插入在拓扑发现协议中,应该可以获得更长的网络寿命。在成簇阶段,上面的算法是将子节点数目最多者设置为簇头,但是簇头的能量却有可能是最小的,这样的条件下就会多次重复选举簇头,为了减少重复选举过程,我们可以在选举过程中将能量作为优先考虑要素,抱着这种想法在同样的环境下进行了模拟。下图中给出了在这种情况下,首个节点出现死亡的时间的对比,以及相同条件下的组网成功率对比。如图中所示,虽然选举能量最大者作为簇头可以有效延长首节点死亡时间,但是组网成功率低于最大连通性的簇头选举方法,网络寿命与最佳连通性两者之间如果在提出的选举簇头的方案上做改变并不能同时满足。

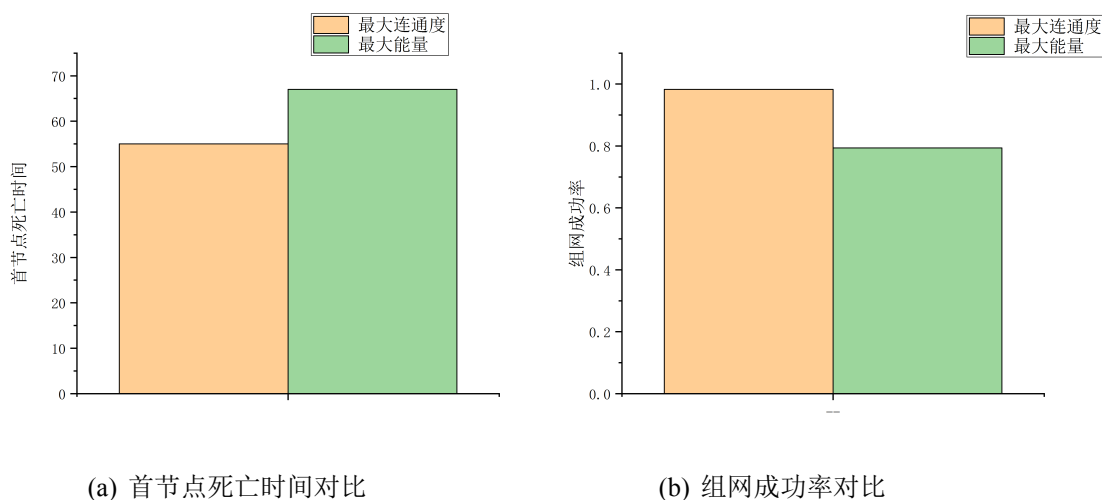


图 3-14 能量拓扑对网络性能的影响

## 第四章 总结与展望

### 4.1 论文总结

本文给出了认识无线电组网的一种策略，方案中包括了从节点交汇到路由发现和数据传输的整个阶段，第二章中详细地对算法的执行过程进行了描述，并在第三章中给出了仿真结果与分析，并尝试了一种改进策略。

### 4.2 论文展望

上文中模拟了从节点交会到正常通信的全过程，但是文章的缺点也是显而易见的，成簇的算法作为一种分布式与集中式两者的妥协产生的结果，在获得了两者的部分优点的条件下，也同样具备了两者的缺点，簇头作为网络中权值较重的节点，担任着本不应该由普通节点担任的责任，这样实际上破坏了节点间的公平性，所以若是想要解决这个问题，需要提出一种周期性簇头轮换策略，但是又应该保证轮换过程中簇结构不会发生较大改变，避免对正常通信产生过大的干扰，这需要一个能量与连通性之间的权值，综合考虑两种因素之后决定应该由那个节点担当簇头，另外一种策略就是抛弃分簇思想直接从分布式结构入手，这样符合了节点间的公平性，但是也不再拥有低难度的设计参考，对系统方案的设计者提出了更高的要求，因为既要满足节点的自私策略又要获得最佳的通信效果与网络寿命。希望在以后的学习生涯中可以完善组网方案，可以在分布式的结构上提出新的想法。

## 参考文献

- [1] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Communications. 55 (1). 2007, 1: 21–24.
- [2] D Cabric R W Brodersen, A Tkachenko. Spectrum Sensing Measurements of Pilot Energy and Collaborative Detection [C]. In MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference, 2006: 1–7.
- [3] Yao F, Wu H, Chen Y et al. Cluster-Based Collaborative Spectrum Sensing for Energy Harvesting Cognitive Wireless Communication Network [J]. IEEE Access. 5 (3). 2017, 5: 9266–9276.
- [4] A Ghasemi E S Sousa. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]. In First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005: 131–136.
- [5] X Liu Z Ding. A Channel Evacuation Protocol for Spectrum-Agile Networks [C]. In 2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007: 292–302.
- [6] Wang L C, Wang C W, Adachi F. Load-Balancing Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 29 (4). 2011, 4: 757–769.
- [7] Chunyi Peng Ben Y Zhao, Haitao Zheng. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access [J]. Mobile Networks and Applications. 11 (4). 2006, 8: 555–576.
- [8] Feng W, Cao J, Zhang C et al. Joint Optimization of Spectrum Handoff Scheduling and Routing in Multi-hop Multi-radio Cognitive Networks [C]. In 2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, 2009: 85–92.
- [9] Huang X L, Wang G, Hu F et al. Stability Capacity Adaptive Routing for High Mobility Multihop Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 60 (6). 2011, 6: 2714–2729.
- [10] Saleem Yasir, Yau Kok-Lim Alvin, Mohamad Hafizal et al. SMART: A SpectruM-Aware ClusteR-based rouTing scheme for distributed cognitive radio networks [J]. Computer Networks. 01. 2015, 11: 196 – 224.
- [11] 吴锐. 认知无线自组网中组网技术研究 [学位论文]. 北京邮电大学, 2016.
- [12] 徐雅静. 数据结构与 STL [M]. 北京邮电大学出版社, 2014.
- [13] 苏驷希. 通信网性能分析基础 [M]. 北京邮电大学出版社, 2005.

## 致 谢

大学四年的生活即将结束，感谢这四年出现在我四年的本科学习生涯中的每个人。

首先，感谢信息与通信工程学院对我的悉心教育与耐心培养，学院的老师们带我走进了通信工程的大门，并且让我看见了身为科研人员的那份毅力与初心，工程的思想不仅仅是在学习上，在生活与人生上都带给了我很多启示，让我愈发明白了终生学习的意义与价值。

其次感谢我的毕设导师，是他在毕设的过程中耐心帮助与指点，提出了很多参考意见与建议，明确地指出了我想法中的错误，恩师的言传身教、面命耳提，是我能顺利完成此次毕设的重要条件。

最后感谢我的同学与学长，在学习与生活上遇到难题时提供了很多建议与帮助，也是你们的陪伴让我找到了前行的力量与勇气。同时也感谢北邮人论坛与多个知识分享平台的好友，开阔了我在其他领域的视野与思维，让我看到了大千世界的无限可能，也知晓了不曾发现的事实真相，这让我更加确定了自己的人生目标。

大学四年的一切即将过去，我将带上你们给予我的一切坚持前行，努力让自己变得更加强大与勇敢。

# 外文译文

## 多跳多无线电认知网络中频谱切换调度与路由的联合优化

Mustafa Ozger, Fatih Alagoz, and Ozgur B. Akan

IEEE Communications Magazine

### 第一章 摘要

认知无线电可以动态频谱访问在空闲时使用许可的频谱。CR 技术被应用于无线自组网和传感器网络中，分别形成了 CRAHNs 和 CRSNs。簇是一种高效的拓扑管理技术，通过对 CRAHNs 和 CRSNs 中节点的认知能力来规范通信和分配频谱资源。在本文中，我们将深入研究这些网络中的拓扑、频谱和能量管理等簇的优点和功能。我们还概述了在 CRAHNs 和 CRSNs 中成簇的原因和挑战。对现有的成簇方案进行了回顾和比较。最后，我们揭示了在多通道 CRAHNs 和 CRSNs 中对频谱感知的主要想法和可能的解决方案。

### 第二章 概述

对无线通信的过度需求导致了频谱短缺，虽然没有授权的频谱频带过于拥挤，但许可的频段并没有得到有效利用。认知无线电 (CR) 是一种很有希望的解决方案，它可以通过使二级用户 (SUs) 的动态频谱访问 (DSA) 机会性使用空闲的许可频带。因此，CR 通过访问许可的通道，而无需对授权用户进行任何干扰，从而保证主用户的通信。

在无线网络中，认知用户与主用户共存，这种网络被命名为认知网络。如图 1 所示，它们可以被划分为四个不同维度的区域。首先，这样的网络可以利用单一的许可频段或多个授权信道。第二，这个网络可能有一个集中式的或分布式的网络架构。集中式的无线网络，即认知无线网络 (CRNs)，用基站来管理无线通信。另一方面，在分布式系统中，有一个没有任何中央实体来规范二次通信的扁平架构。这些分布式的支持 cr 的无线网络可以被称为认知无线电特别和传感器网络。认知无线电自组网 (CRAHNs) 是由 CR 技术支持的平面架构，以充分利用稀缺的许可频谱 [1]。与 CRAHNs 不同的是，认知无线电传感器网络 (CRSNs) 被用于感知，并由具有更低计算能力和有限电池电量的节点组成 [2]。这篇文章主要内容是关于多通道 CRAHNs 和 CRSNs 的领域，如图 1 所示。每一个 SU 都有 DSA 功能，即频谱感应来决定空闲的许可信道，频谱决策来决定操作通道，以及频谱切换，以在主用户到达时清空操作中的信道，因此，SUs 使用这些功能来发现频谱空穴，即不在占用的空的许可频段。SUs 与 PUs 共存，它们都被随机部署在网络中。因此，主用户的活动引起了附近 SUs 的频谱空穴的时间变化。另一方面，阴影、

衰落和网络拓扑是导致空闲频谱带的变化的主要因素，阴影和衰落影响频谱感知，以及造成错误警报和错误检测的主用户活动都会对认知用户产生影响。网络拓扑根据认知用户的相对传输范围的不同而有所不同。对于 CRAHNs 和 CRSNs，有两种网络拓扑结构 [3]。在拓扑 I 中，在不同授权的通道中运行的网络中有一些主用户，然而，主用户网络的传输范围比认知网络大，因此主用户网络覆盖了一个辅助网络 ( $r \gg R$ )，如图 2a 所示。根据授权频带内主用户的活动，将会产生时间变化的频谱空穴。此外，由于阴影和衰落的影响，空闲频谱也会有空间变化。因此，在可使用的授权频段的认知设备会出现时空变化，尽管图 2a 中使用通道 1 和 2 的两个主用户覆盖了所有的 CRs，其范围内的认知设备的空通道列表可能仍然会有所不同。

在拓扑 II 中，主用户的传输范围可以与认知设备 ( $R > r$ ) 的传输范围相比，如图 2b 所示。因此，即使所有的主用户都使用他们的许可频谱，对于位于传输范围之外的认知节点也会有频谱空穴可以使用。此外，在信道使用中，时间的变化导致了在其传输范围内的认知设备的频谱可用性的时间变化。这个模型产生了一个非常动态的无线电环境。提出的网络解决方案必须考虑在多通道的 CRAHNs 和 CRSNs 之间的协调。成簇是一种基本的解决方案，可用于管理分布式无线网络中的通信 [4]。这种方法可以在逻辑上对节点分组，每个这种组都被称为一个簇。在簇结构中，有一个簇头，它组织簇内成员之间的通信和簇间通信。因此，分布式网络通过簇头的成簇来提高网络中的通信性能，从而实现稳定和协作 [4]。由于拓扑 I 和拓扑 II 的 PU 活动，在这个高度动态的无线电环境中，CRAHNs 和 CRSNs 也受益于簇来协调频谱感知的结果。因此，成簇需要考虑簇内成员 CRAHNs 和 CRSNs 之间常见的空闲许可信道，以及簇头和簇内成员的地理位置。因此，这种类型的簇被称为频谱感知簇。由于该特性，成簇被作为一种功能工具，用于认知周期功能、访问控制、路由和管理多通道通信。尽管有其优势，但必须仔细考虑一些关键的挑战，例如异构的授权渠道和网络中空闲信道的动态变化，在此基础上提出成簇解决方案。本文组织如下。下一节将详细解释簇的功能。在此之后，我们讲解成簇过程并解释其中的挑战。在此基础上，提出现有的聚类方案，并在此基础上对现有的聚类方案进行了比较。接下来，我们提出了对 CRAHNs 和 CRSNs 的设计考虑和一种很有潜力的成簇解决方案。最后一节总结我们的文章。

## 第三章 成簇操作

本节详细阐述了簇如何应用于各种功能及其与网络操作的通信。这些功能广泛涉及三个操作领域，即感知、网络层和 DSA 操作，如图 3 所示。每个操作区域的详细解释在下面的小节中给出。

### 3.1 感知操作

传感器网络利用簇，利用相关性对簇头聚集的信息进行分类，因此，簇可以利用传感器节点对频谱感知的空间和时间相关性。由于观测与时间和空间域相关，所以这两种



拓扑都能从簇中受益。簇的另一个好处是由于成簇而减少的数据包传输，因此减少了能源消耗。由于聚合的原因，感知相关性会影响路由、中间访问和无线传输功能。

### 3.2 网络层操作

簇为无线自组织网络中提供了路由功能。然而，由于可用频段的动态变化，认知网络带来了额外的挑战，即通信的认知设备之间的一个公共通道是转发数据包的一个附加条件，也是束缚通信的一个因素。由于簇的形成依赖于利用空间和时间相关形成的成员之间的公共信道，所以为源节点与目的节点之间的通信减小路由路由开销提出了新的要求。因此，两种网络拓扑都可以利用簇的路由功能。参考文献 [5,6] 是两个例子，解释了如何在动态的无线电环境中使用簇来进行路由发现。文献 [5] 中提出了从单独事件到事件槽的成簇方案。根据 DSA 和服务质量 (QoS) 要求，簇也被用于在 CRSNs 中为多媒体数据包提供路由 [6]。

簇也提供了中间访问的功能，在动态无线电环境中，最重要的因素之一是空闲许可信道的 PU 的存在和争用问题。可以设计一个中等访问方案，这样簇中的每个节点都可以访问空闲通道 [7]。基于簇的介质访问提供了更高的吞吐量和更小的延迟和更少的能源消耗。簇头可以作为协调器，在感知空通道协作后，作为访问频谱的协调器。在两种拓扑中都可以使用簇来进行介质访问，以支持基于许可频带的空间和时间变化的频谱感知通信。

### 3.3 动态频谱介入操作

频谱共享和决策操作是服务于特定目标的。争夺空置的授权频段和 PU 的出现是共享频谱和决定一个通信用的波段的两个重要因素。由于簇是根据常见的空信道形成的，簇头决定簇内通信的操作通信通道，这有助于频谱决策。例如，可以利用成簇来减少功率和子通道分配对 SU 的干扰 [8]。成簇在频谱共享与频谱决策两个方面对两种拓扑都是有益的。频谱感知是 DSA 的一项操作。簇内的节点将会把各自的频谱感知结果发送给簇头，簇头将会进行空白授权频段的本地频谱决策。簇头将会决策 PU 的存在性，从而会对物理层产生影响，簇内的节点通过协作来达到频谱感知结果的共识，虽然成簇可以用于两种拓扑结构，但是主要用于拓扑 1 中，这是因为拓扑 1 中的空间变化较少，由于频谱感知的阴影，衰落和感知结果的不完整性，簇内的节点需要通过合作来确定拓扑中频带的空缺。

在整个网络中，CRAHNs 和 CRSNs 的另一个问题是公共控制通道的可用性。簇功能提供了簇内成员之间的本地控制通道，簇内成员之间的控制消息通过这些控制通道传

输 [9]。由于拓扑 II 引起高度动态的空间和时间变化，控制信道分配更适合拓扑 II。

## 第四章 CRAHNS 与 CRSNs 中的成簇动机与挑战

成簇是一种组织整个网络的十分有效的方法，并且可以作为本地的协调器，以便能够以结构化的方式执行频谱感知结果的通信，因此我们详细描述了这两种网络中的关键过程与挑战。

### 4.1 成簇动机

成簇可以形成逻辑组，以便更好地利用特定网络中的资源。它对 DSA 的自组网更有好处，因为可以通过将邻居节点按其空闲信道分组来高效地执行频谱感知通信。因此，我们详细列出了成簇的动机。

节点间的协调: 在每个集群中，有一个集群头控制其组内的通信。此外，相邻的簇头可以通过它们的公共通道直接通信，也可以通过它们的成员通过多个跃点进行通信。簇头可以被认为是调节 SUs 之间的频谱感知通信的虚拟通道，它使得 SU 之间实现协调。

可伸缩性: Ad hoc 和传感器网络具有较高的网络密度，因此这些网络中的协议和解决方案可能无法扩展。在已经提出的方案中，网络的可伸缩性会由于认知节点在频谱的高度动态变化环境中不断进行通信而产生变化，在同构网络之上，簇可以产生虚拟节点 (即: 为了提高网络的可扩展性 [4])。

网络性能的改进: 在多通道动态无线电环境中，相邻节点按其空闲许可信道进行分组。如果簇中的一个公共通道被 PU 占用，簇内的通信将继续通过另一个公共通道进行。因此，由于具有频谱感知的聚合，CRAHNS 和 CRSNs 在其操作通道上可以对 PU 到达者免疫，从而提高了网络性能。

节点间的协作: 认知周期循环，即频谱感知、频谱决策和频谱切换，可以以一种高度结构化的方式进行聚类管理。这些复杂的任务以集群成员之间的协作方式执行。由于簇内成员之间有共同的通道，簇头可以很容易地协助合作。此外，簇头之间的协作可以提高节点的通信性能。

建立局部控制通道: 在频谱感知通信中最重要的问题是在整个网络中假设一个公共控制信道。然而，由于整个网络中空闲的许可信道的动态行为 (例如，主用户的活动)，这种假设是无法实现的。由于簇是在一个社区内形成的，所以簇中存在着用于调节簇内成员间通信的本地公共控制通道。

多通道通信支持: 每个簇内成员之间有多个公共通道，因此，簇头可以通过同时支持多个信道的使用，在簇成员之间分配频谱资源。

## 4.2 成簇的挑战

除了成簇动机中提出的要求, CRAHNs 和 CRSNs 同样也有着不同的挑战, 具体内容如下。

多信道的环境: 认知功能 CR 提供 PU 占用的信道的利用率。在这种类型的环境中, 成簇是根据物理接近性和节点形成簇之间的共同通道来进行的。因此, 节点应该知道空闲的许可信道, 同时整个簇需要调优到同一频段进行通信。

许可频带可用性的动态变化: 威胁集群稳定性的最重要因素之一是集群中空白频段的动态变化。如果集群成员之间没有公共通道, 则应该重新聚集这些节点。因此, 形成的网络必须对可用谱带的变化具有很强的鲁棒性。此外, 频繁的重新聚类会导致新簇形成的控制信息导致能量消耗。

许可信道的异质性: 在多通道 CRSNs 和 CRAHNs 中, 许可信道的特性 (如带宽和载波频率) 可能存在不同。这种差异可能导致不同的比特率、传输范围等。

## 第五章 Spectrum-Aware 集群方案

在集群成员中拥有常见的空闲授权信道是文献中对频谱感知聚类协议的共同要求。然而, 在形成集群的同时, 它们在邻近区域有不同的方法。我们概述了最近在动态无线电环境中成簇的现有方法。

鲁棒谱共享 (ROSS)[10]: 这种聚类方案的目标是簇的鲁棒性, 这意味着在增加 PU 活动的情况下, 簇的最终可持续性。[10] 的作者提出了一种分布式聚类算法, 该算法能够通过 CR 节点的相邻节点之间的相互作用来实现簇的形成。它包括两个级联阶段, 即簇形成和成员资格的确认。首先, 根据连接性向量来选择簇头, 它由个体连接度和邻域连接性程度组成。在此阶段, 保证簇成员之间的公共通道, 并控制簇大小。在此之后是簇内成员资格的确认。簇内成员资格的确认过程被视为一种拥塞游戏。有争议的节点大多是不同集群的重叠节点, 在加入不同的簇之后, 应当选择具有最高公共通道的簇加入。

关联传播 (AP)[11]: 该算法应用亲和传播, 使 CR 节点作为数据点, 簇头作为样本。其主要目的是减少整个网络中簇的数量, 相似性度量的是 CRs 共享的公共通道, 簇的目标是尽可能多地使用簇中其他节点的可用通道, 而选择作为簇头的概率是由 CRs 的节点度决定的。

频谱机会成簇 (SOC) [9]: SOC 是一种成簇算法。簇的形成有三个步骤。在第一步中, 节点知道它们的邻居和它们的空通道, 它们形成了邻居表, 表包括最大可用性边与最大度数的节点信息, 这些表将会向所有邻居广播, 第二步中将会根据最大的簇或者最多度数的边选择最佳表, 那些包含在多个簇中的节点会被移除, 簇头则是与簇内成员只有单跳距离的节点, 这也是第三部的操作。

组合 [12]: 在这种成簇方案中, 节点知道它们的 k 跳邻居及其对应的空通道, 所有的 CRs 都计算与 k 跳邻居的最小公共通道数。根据这一信息, 每个 CR 都分配一个权

重，用于簇头的选择过程。其邻域内权重最高的节点成为簇头。这些节点向集群发送成员请求。如果一个节点收到多个请求，它将选择权重最高的一个。

CogLEACH[13]: 在这种成簇方法中，簇头的期望数目是固定的，并且通道数量较多的节点更有可能成为簇头。根据这些条件，每个节点都被分配一个成为簇头的概率。非簇头节点根据接收到的信号强度将连接请求发送到簇头，并以最少的通信成本发送连接请求。

分布式频谱感知聚类 (DSAC) [14]: DSAC 方案试图将总能耗最小化，这是簇内和簇间通信消耗的能量之和。根据平均消耗能量确定了最优簇数。对于分布式算法，将可用通道约束局部最接近的对合并为簇。

表 1 总结了上述讨论，并根据网络对现有的成簇方案进行了总体比较，并给出了成簇的步骤。

## 第六章 CRAHNs 与 CRSNs 的分布式成簇

尽管在文献中存在频谱管理、介质访问控制和路由解决方案的成簇方案，但没有足够的成簇方案研究来满足 CRAHNs 和 CRSNs 的内在要求。为此，我们确定了网络需求和簇设计两者作为考虑因素。之后，我们简要概述了在 CRAHNs 中分布式集群方法的潜在解决方案，以及在 CRSNs 中的事件驱动成簇方法。

### 6.1 网络需求

CRAHNs 有独特的需求，其中之一是由于认知设备与主用户的流动性，管理频谱利用率的高变化频率。此外，必须满足不同的 QoS 需求。例如，多媒体应用程序需要有限的延迟和较低的抖动。另一个要求是对主用户的干扰是有限的。如果是因为主用户活动影响到信道，那么这将会干扰主用户活动，这是不可取的。在 CRSNs 中有更多的对于簇的需求。首先，传感器节点的电池电量有限。因此，成簇解决方案必须是节能的。由于成簇需要一个控制信道进行控制与维护，我们提出的解决方案必须防止出现过大的开销，因为过大的开销将会提高认知设备的能耗水平。在认知操作方面，提出的簇应避免操作通道的频繁变化，因为频谱切换和频谱感知等认知周期功能消耗了大量的能量。此外，传感器节点的计算能量有限。因此，建议的聚类方法应该很简单。能量效率和低计算开销是 CRSNs 中成簇解决方案的两个额外要求。

### 6.2 成簇设计考虑事项

CR 设备的操作与网络架构是在设计网络架构中主要需要考虑的因素。由于认知自组网与认知传感网络的不同要求，成簇的注意事项也会有所不同。因此我们解释了这两种网络中的相同与不同之处。

常见的设计考虑: 第一个共同的考虑是, 在形成的集群中至少需要有一个相互的空通道。簇节点必须通过公共通道进行通信。

频谱感知的缺陷也很重要, 因为成簇是根据空谱带进行的。由于信道感知性能较差, 可以根据 CRs 的错误空通道列表来形成簇。由于其简单性 [1], 常用的频谱感知方法是能量检测 [0]。然而, 这种方法在传感过程中存在缺陷。因此, 误检和误报的概率对于簇的稳定性是很重要的。

节点的移动性极大地影响了频谱利用率的异质性, 这直接改变了簇的形成。由于 SU 的移动性, 簇头可能失去与成员的连接。因此, 应该为集群中的传入和传出节点设计簇结构更改、关联和分离机制。此外, 主用户的移动性会使 SU 的频谱利用率发生更动态的时空变化。

对簇的维护是另一个考虑因素。高度变化的授权用户活动增加了维护簇的成本。由于这些动态影响, 一些节点可能会离开当前的簇, 或者加入另一个节点, 从而导致包开销和能源消耗。

针对 CRAHNs 的设计考虑: 在特定网络中的流有不同的 QoS 级别。由于主用户的活动, 这种考虑变得困难。簇必须考虑到它们来支持不同的 QoS 级别。为了支持更好的通信质量, 簇的另一个考虑是异构的许可信道, 这导致了不同的特性, 如传输范围和比特率。在集束形成过程中, 必须利用较少的 PU 到达通道来降低频谱切换的概率, 当然这也会增加能量消耗。

特定于 CRSNs 的设计考虑: CRSNs 是具有事件驱动的通信。节点在发现事件后报告其观察结果。如果频率足够低, 那么在事件发生后就不需要维护集群, 因为在下一次事件之前它们不会被使用。集群解决方案应该考虑 CRSNs 的这种独特属性。

能源效率是 CRSNs 的另一个考虑因素, 因为节点的电力有限。尽管簇提供了能量节省策略, 但由于重新聚类和控制开销, 认知用户活动可能会降低集群所提供的能源效率。

### 6.3 对 CRAHNs 的分布式集群方法

在 CRAHNs 中没有一个集中的实体需要 CR 之间的合作。簇提供了自组网结构之上的层次结构, 以改善网络中的本地合作。为此, 我们解释了分布式成簇方法中可能存在的问题和解决方案。

在整个网络中存在一个共同控制信道的普遍假设。但是, 由于 PU 的活动, 这是很不现实的。为了使它更真实, 这个通道被认为是一个非常窄带的通道, 它可能容易堵塞。因此, 提出的协议不能依赖于这样一个通道的存在。可以通过通道跳跃或会合方法通过相同的通道进行通信, 以配合小区内簇的形成。但是, 由于通道切换, 这种方法有很高的开销。针对分布式认知无线网络, 提出了一种盲交会算法, 使通信节点不需要一个通用的控制信道和可用的信道信息 [15]。该算法保证在不需要时间同步的情况下进行集合, 并占用较短的时间进行成簇。

现有的集群方案形成了针对动态可用信道变化的健壮集群。因此，应该采用启发式算法来设计一种能够最大限度地增加簇中成员节点数目的聚类方案。可以建立公共通道大小和簇成员之间的平衡，以形成健壮的集群，如 [9]。除了集群的形成之外，它们的维护是在现实场景中需要考虑的另一个问题。簇维护解决方案应该适应簇中公共通道的变化。簇头可以通过较少节点重新形成簇，以实现公共通道，相互连接的节点不应该减少公共信道的数量从而导致稳定性的降低。

除了动态的无线电环境外，网络节点的移动性使得它们之间的合作更具挑战性。提出的成簇算法应该具有机动性。如果一个簇头与它的成员失去联系，这将导致重新聚类，这是一种高效的成簇方法应该避免的。为了解决这个问题，一个在其附近具有较高迁移率的节点不应该是簇头。节点可能有权重来度量节点的迁移率，以在本地社区中选择簇头。通过这样做，它不太可能重新聚合节点，因为簇头不会与它的成员断开连接。此外，簇必须管理传入和传出的认知设备，以更新簇成员来管理网络拓扑。簇中的无线电资源分配是由于移动节点的关联和分离而降低的。

簇内的通信管理也应该考虑到频谱的流动性。簇的工作频带可能被占用；因此，簇内成员应该组织簇内的通信，从而使一个新的空通道具有有限的延迟。由于频谱切换，CR 节点消耗能量。因此，应该选择最小 PU 到达统计量的集群通道作为操作通道，以避免频谱切换。根据 PU 的到达统计量来衡量通道，有助于选择更多的空闲通道进行簇内通信。

现有的成簇方案假设有同质的许可信道，它们的信道特性是相同的。然而，在现实的多通道 CRAHN 场景中，它们的带宽和中心频率可能不同。因此，这些渠道的特点各不相同。例如，许可渠道的频谱感知结果在这种情况下是不同的。此外，授权渠道的比特率也不同。不同通道上的 pu 特性可能会有很大的差异，这就导致了变化频繁的通道可用性。如果网络需要更多的覆盖，形成集群的一个可能的解决方案是将相邻节点与具有较低中心频率的通道进行分组。

为了实现多通道动态无线电环境下的成簇目标，本文详细介绍了成簇的一些问题及其各自的解决方案和研究方向。但是，为了解决 CRAHNs 的问题，需要提出一种整体的聚类解决方案。

## 6.4 CRSNs 中的一种事件驱动方法

CRSNs 具有事件驱动流量，以便在事件发生时利用现有的资源。因此，事件驱动的成簇方法在 [5] 中被证明对 CRSNs 是有效的。此外，由于位于该区域的节点将参与将事件包转发到接收器，因此这种方法将会在事件和接收器之间的区域内成簇。我们将用分布式成簇方法解释 CRSNs 的可能解决方案和研究方向。

通过利用簇成员之间的空间和时间相关性，在相应的簇头整合事件消息。此外，可移动感知事件频谱感知集群协议 (mESAC)[5] 考虑了 CR 节点的可移动性来维护集群。通过考虑 CRSN 节点的能量约束，应该仔细考虑事件期间簇的维护。簇头可以减少成员

的数量以增加公共通道的数量，以避免完全重新成簇。相反，可能的重新成簇解决方案应该考虑在本地划分节点。因此，需要重新聚类的节点可能与邻近的簇相关联。关联过程应该以最小的开销执行，并且不应该降低关联集群的公共空闲通道的数量。

簇结构的快速收敛是降低簇内通信开销的最重要目标之一。在设计成簇算法时，优先考虑簇头，可能会影响算法的收敛性。簇头优先算法收敛速度更快，因为簇头通过更少的迭代根据空闲的许可通道与邻居关联从而形成簇。在确定簇头之后，它们通过将集群请求发送给邻近的节点来直接形成簇。

异构多通道在 CRSN 域中没有被提到过，这种异质性导致不同的通道吞吐量、通信范围和错误概率。因此，它影响成簇性能和能量消耗。通道切换经常发生，以便使用具有更好特性的通道。因此，可能的聚类解决方案必须包括 PU 到达量少、空闲概率多的通道，这就降低了重新成簇的可能性。

可能的成簇解决方案还应该考虑集群的连接性。解决方案中应当设定簇头，这样相邻的簇头就可以通过单跳的公共通道进行通信。如果相邻簇的簇头之间没有公共通道，它们可以通过动态无线电环境中的多个跳来通信。如果簇头直接相互通信，则可能会由于距离较远的通信而导致对另一个 SUs 和 pu 的碰撞和干扰，这就需要包开销来在相邻簇头之间的同一通道上会合，这样集群头与成员节点之间的多跳通信在对 pu 的干扰和能量消耗方面效率更高。

## 第七章 总结

本文研究了多通道认知无线电自组网和传感器网络中的成簇问题。为此，我们描述了簇如何为不同的操作区域提供功能，并解释了成簇的好处。概述了成簇的动机和挑战。对现有的成簇解进行了研究，此外，我们提出了可能的聚类解决方案来解决 CRAHNS 和 CRSNs 中的问题。

# Clustering in Multi-Channel Cognitive Radio Ad Hoc and Sensor Networks

Mustafa Ozger, Fatih Alagoz, and Ozgur B. Akan

The authors investigate the benefits and functionalities of clustering such as topology, spectrum, and energy management in CRAHNs and CRSNs. They also discuss motivations for and challenges of clustering in CRAHNs and CRSNs. Existing clustering schemes are reviewed and compared. They conclude by revealing key considerations and possible solutions for spectrum-aware clustering in multi-channel CRAHNs and CRSNs.

## ABSTRACT

CR enables dynamic spectrum access to utilize licensed spectrum when it is idle. CR technology is applied to wireless ad hoc and sensor networks to form CRAHNs and CRSNs, respectively. Clustering is an efficient topology management technique to regulate communication and allocate spectrum resources by CR capabilities of nodes in CRAHNs and CRSNs. In this article, we thoroughly investigate the benefits and functionalities of clustering such as topology, spectrum, and energy management in these networks. We also overview motivations for and challenges of clustering in CRAHNs and CRSNs. Existing clustering schemes are reviewed and compared. We conclude by revealing key considerations and possible solutions for spectrum-aware clustering in multi-channel CRAHNs and CRSNs.

## INTRODUCTION

Excessive demand for wireless communications has resulted in spectrum scarcity. Although unlicensed spectrum bands are overcrowded, licensed ones are not efficiently utilized. Cognitive radio (CR) stands as a promising solution to overcome this problem by enabling dynamic spectrum access (DSA) for secondary users (SUs) to use idle licensed bands in an opportunistic manner [1, 2]. Hence, CR empowers the communication of SUs by accessing licensed channels without any disturbance to primary users (PUs), which are the licensed users.

SUs coexist with PUs in wireless networks, which are named CR-enabled wireless networks in general. They can be divided into four domains across two dimensions, as seen in Fig. 1. First, such a network may utilize either a single licensed channel or multiple licensed channels. Second, this network may have either a centralized or a distributed network architecture. Centralized CR-enabled wireless networks, that is, cognitive radio networks (CRNs), have base stations that regulate wireless communications. On the other hand, in distributed ones, there is a flat architecture without any central entity regulating the secondary communication. These distributed CR-enabled wireless networks can be referred to as *cognitive radio ad hoc and sensor networks*. Cognitive radio ad hoc networks (CRAHNs) are flat architectures backed by CR technology to make the most use of scarce licensed spectrum [1]. Different from CRAHNs, cognitive radio sensor networks (CRSNs) are employed for sensing applications and consist of

nodes with much less computational capabilities and limited battery power [2]. This article focuses on the domain of multi-channel CRAHNs and CRSNs, as seen in Fig. 1.

Each SU has DSA functionalities, which are spectrum sensing to determine idle licensed channels, spectrum decision to determine operating channel, and spectrum handoff to vacate the operating channel if PUs arrive. Hence, SUs use these functionalities to exploit spectrum opportunities, that is, vacant licensed spectrum bands.

SUs coexist with PUs, and both of them are randomly deployed in the networks. Hence, activities of PUs cause temporal variations in spectrum opportunity for nearby SUs. On the other hand, shadowing, fading, and network topology are main drivers, resulting in spatial variations of idle spectrum bands. Shadowing and fading affect spectrum sensing, and cause false alarms and misdetection of PUs. Network topology differs according to relative transmission range of PUs with respect to that of SUs. There are two network topologies for CRAHNs and CRSNs, which are Topology I and Topology II [3]. In Topology I, there are PUs in the network operating in different licensed channels. However, the transmission range of PUs is larger than that of CRs<sup>1</sup> such that a PU network covers a secondary network ( $R \gg r$ ), as seen in Fig. 2a. According to licensed channel usage activities of PUs, there would be temporal variations in spectrum opportunity. Also, there would be spatial variation in vacant licensed bands due to the effects of shadowing and fading. Hence, there would be spatio-temporal variations in the available licensed spectrum bands of CRs. The vacant channel lists of CRs may differ, although two PUs using channels 1 and 2 in Fig. 2a cover all the CRs.

In Topology II, the transmission range of PUs is comparable with that of CRs ( $R > r$ ), as seen in Fig. 2b. Hence, even if all the PUs use their licensed spectrum, there would be spectrum opportunities for the CR nodes located outside of the transmission ranges of PUs. Furthermore, time variations in the channel use of the PUs result in temporal changes in the spectrum availability of CRs located inside their transmission range. This model causes a very dynamic radio environment.

Proposed networking solutions must consider coordination among SUs for the communication in multi-channel CRAHNs and CRSNs. Clustering is a fundamental solution that can be used to manage and regulate communications in distributed wireless networks [4]. It groups neighboring nodes

<sup>1</sup> SU and CR are used interchangeably throughout this article.



logically in such networks. Each of these groups is called a cluster. In a cluster structure, there is a cluster head that organizes the communication between its cluster members (intra-cluster communication) and with other clusters (inter-cluster communication). Hence, distributed networks benefit from clustering by imposing cluster heads to enhance communication performance in the network by achieving stability and supporting cooperation [4]. CRAHNs and CRSNs also benefit from clustering to coordinate spectrum-aware communication in this highly dynamic radio environment due to PU activities for Topology I and Topology II. Hence, clustering needs consideration of common idle licensed channels between cluster member CRAHNs and CRSNs in addition to physical proximity of cluster head and cluster members. Hence, this type of clustering is called spectrum-aware clustering. Due to this feature, clustering is used as a functional tool for cognitive cycle functions, medium access control, routing, and managing multi-channel communications. Despite its advantages, some key challenges such as heterogeneous licensed channels and dynamic change in vacant channels in the networks must be carefully considered to propose clustering solutions.

This article is organized as follows. Functionalities of clustering are explained in detail in the following section. After that we motivate the clustering and explain challenges thereof. Existing clustering schemes are then presented and compared based on their implementability and offered features. Following that we present design considerations and potential clustering solutions for CRAHNs and CRSNs. The final section concludes our article.

## FUNCTIONALITIES OF CLUSTERING IN CRAHNs AND CRSNs

This section elaborates how clustering can be employed for various functionalities and their correspondence with network operations. Such functionalities broadly relate to three operation areas, which are sensing, network layers, and DSA operations, as seen in Fig. 3. Detailed explanations of each operation area are given in the following subsections.

### SENSING OPERATION

Sensor networks utilize clustering to aggregate gathered information at the cluster heads by exploiting correlation. Hence, clustering can exploit spatial and temporal correlation of sensor nodes' observations on spectrum sensing. Since observations are correlated in time and spatial domains, both topologies can benefit from clustering for sensing operations. Another benefit of clustering is fewer packet transmissions due to aggregation and hence less energy consumption. Sensing correlation affects routing, medium access, and wireless transmission functionalities due to aggregation.

### NETWORK LAYER OPERATIONS

Clustering provides functionality to routing in wireless ad hoc networks. However, CR brings additional challenges due to dynamic variations in available spectrum bands. A common channel between communicating SUs is an additional constraint to forward a packet. Since clusters are formed to have common channels among their members by exploiting spatial and temporal correlation, it pro-

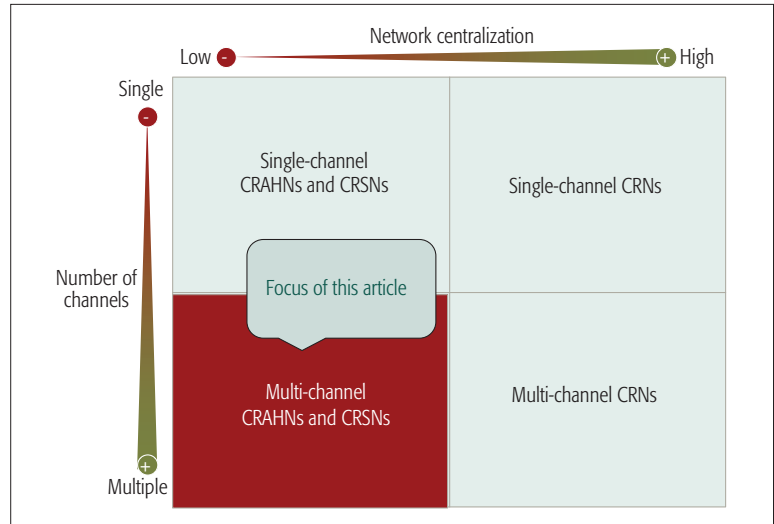


Figure 1. CR-enabled wireless networks segmented into four domains across two dimensions.

vides functionality to routing to reduce overheads while conveying packets from source to destination. Hence, both network topologies can utilize routing functionality of clustering. References [5, 6] are two examples how clustering is utilized for routing in a dynamic radio environment. Directed routing from event to sink is proposed by clustering in [5]. Clustering is also utilized to route multimedia packets in CRSNs according to DSA and quality of service (QoS) requirements [6].

Medium access functionality is also provided with clustering. In a dynamic radio environment, one of the most important factors is the PU presence and contention for the idle licensed channel. A medium access scheme can be designed such that every node in a cluster can access the idle channel without contention [7]. The cluster-based medium access provides higher throughput and smaller delays with less energy consumption. Cluster heads can behave as coordinators for accessing spectrum after sensing vacant channels collaboratively. Medium access can be performed with clustering in both topologies to assist spectrum-aware communications depending on spatial and temporal variations of licensed bands.

### DSA OPERATIONS

Spectrum sharing and decision operations are CR-specific. Contention toward vacant licensed bands and PU arrivals are two important factors to share spectrum and decide on an operating band. Since clusters are formed according to common vacant channels, the cluster head decides on the operating communication channels for intra-cluster communication, which contributes to the spectrum decision. For instance, clustering can be utilized to decrease the interference among SUs by power and sub-channel allocations [8]. The clustering is beneficial for both of the topologies while sharing and deciding on the operating spectrum band.

Spectrum sensing is one of the DSA operations. The nodes in a cluster send their observation about the spectrum to the cluster head for making a local decision about the vacancy in licensed channels. The cluster head behaves as a fusion center to determine the PU presence,

Clustering forms logical groups to better utilize the resources in ad hoc networks. It becomes more beneficial for ad hoc networks with DSA since spectrum-aware communication can be performed efficiently by grouping neighbor nodes according to their idle channels.

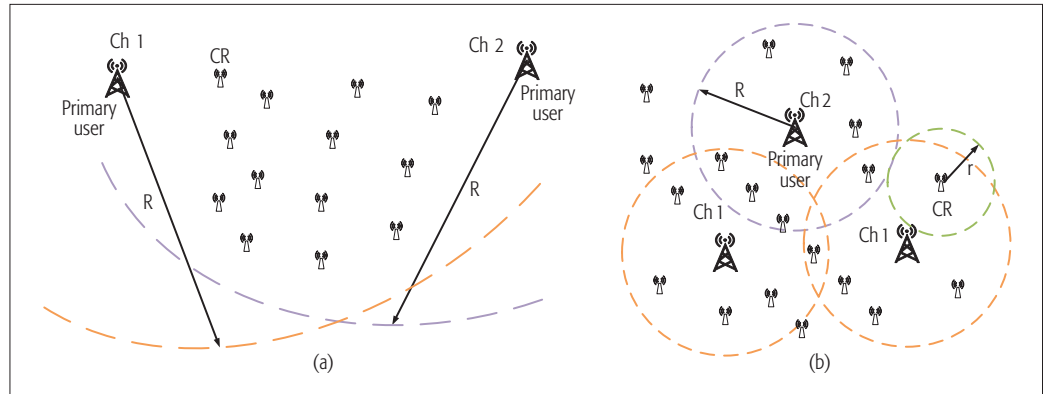


Figure 2. Network topologies: a) Topology I; b) Topology II.

which affects the physical layer of the network. The nodes in the cluster cooperate to reach a consensus for more reliable spectrum sensing. Although clustering can be utilized for spectrum sensing in both topologies, it is mainly used in Topology I due to fewer spatial variations. Due to shadowing, fading, and imperfections of spectrum sensing, CRs within clusters cooperate to determine vacancy of the spectrum bands in Topology I.

Availability of a common control channel throughout the network is another problem in CRAHNs and CRSNs. Clustering functionality provides local control channels among cluster members. Control messages among cluster members are transmitted through these control channels [9]. Since Topology II causes highly dynamic spatial and temporal variations, control channel assignment is more suitable for Topology II.

## MOTIVATIONS AND CHALLENGES OF CLUSTERING IN CRAHNS AND CRSNS

Clustering is an efficient method to organize the networks and to impose local coordinators so that spectrum-aware communications can be performed in a structured way. Hence, we describe key motivations and challenges of clustering in CRAHNs and CRSNs in detail.

### MOTIVATIONS OF CLUSTERING

Clustering forms logical groups to better utilize the resources in ad hoc networks. It becomes more beneficial for ad hoc networks with DSA since spectrum-aware communication can be performed efficiently by grouping neighbor nodes according to their idle channels. Accordingly, we itemize the motivations of clustering as follows.

**Coordination between Nodes:** In each cluster, there is a cluster head that controls the communication within its group. Furthermore, the neighboring cluster heads may communicate directly via their common channels or via multiple hops through their members. The cluster heads can be considered as virtual backbones regulating the spectrum-aware communication between SUs, which provides coordination among the SUs.

**Scalability:** Ad hoc and sensor networks have high network density, so protocols and the solutions in these networks may not be scalable. Furthermore, the dynamic change in the spectrum availabilities of the nodes deteriorates scalability in proposed solutions due to spectrum-aware

communications of a large number of nodes in the network. On top of a homogeneous network, clustering imposes virtual nodes (i.e., cluster heads) to improve scalability of the network [4].

**Improvement in Network Performance:** Neighboring nodes are grouped according to their idle licensed channels in the multi-channel dynamic radio environment. If one common channel in the cluster becomes occupied by a PU, the communication in the cluster continues through another common channel. Hence, CRAHNs and CRSNs become immune to PU arrivals on their operating channels due to spectrum-aware clustering, which increases the network performance.

**Cooperation between Nodes:** Cognitive cycle functions, which are spectrum sensing, spectrum decision, and spectrum handoff, can be managed in a highly structured way with clustering. These complex tasks are performed in a cooperative manner between cluster members. Since there are common channels among cluster members, a cluster head can assist cooperation easily. Furthermore, cooperation between cluster heads results in better communication performance of the nodes.

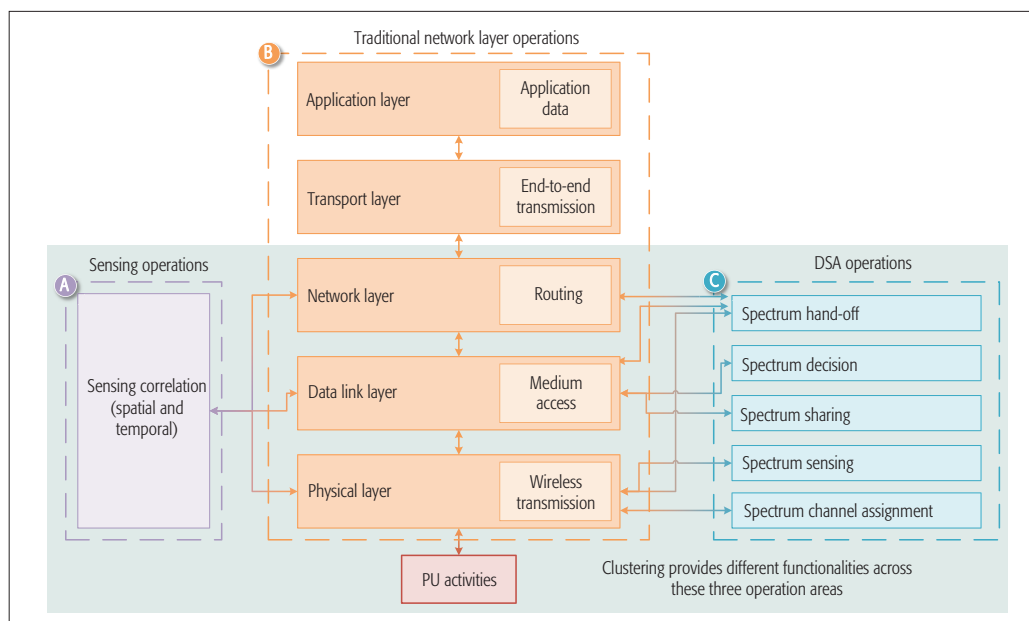
**Imposing Local Control Channels:** The most important problem in spectrum-aware communication is to assume a common control channel in the whole network. However, this assumption is not realizable due to dynamic behavior of the idle licensed channels throughout the networks (i.e., PU activities). Since clusters are formed within a neighborhood, local common control channels exist in the clusters for regulating the communication between the cluster members.

**Multi-Channel Communication Support:** Each cluster has multiple common channels among its members. Hence, cluster heads can allocate spectrum resources among cluster members by supporting usage of multiple channels simultaneously.

### CHALLENGES OF CLUSTERING

Despite the various motivations of clustering in CRAHNs and CRSNs, there are challenges, which are outlined as follows.

**Multi-Channel Environment:** CR capability offers the utilization of channels owned by PUs. In this type of environment, the clustering is performed according to not only physical proximity but also common channels among the nodes forming clusters. Hence, nodes should be aware of idle licensed channels while clustering and tune to the same frequency band for the communication.



**Figure 3.** Functionalities of clustering and their relations with traditional network layers and dynamic spectrum access functions.

### Dynamic Change in Availability of Licensed Bands:

One of the most important factors that threaten the stability of clusters is dynamic change in vacant spectrum bands of the clusters. If there is no common channel among the cluster members, these nodes should be re-clustered. Hence, the formed clusters must be robust to the changes in the available spectrum bands. Furthermore, frequent re-clustering causes energy consumption due to control messages for the formation of new clusters.

**Heterogeneity in Licensed Channels:** Characteristics of licensed channels such as bandwidth and carrier frequency may differ in a realistic scenario in multi-channel CRSNs and CRAHNs. This difference may result in different bit rate, transmission range, and so on.

### SPECTRUM-AWARE CLUSTERING SCHEMES

Having common idle licensed channels among cluster members is a joint requirement for spectrum-aware clustering protocols in the literature. However, they have different approaches apart from common spectrum availabilities in a neighborhood while forming clusters. We overview recent existing approaches for clustering in dynamic radio environment.

**Robust Spectrum Sharing (ROSS) [10]:** This clustering scheme aims at robustness of clusters, which means ultimate sustainability of them in case of increased PU activity. The authors in [10] propose a distributed clustering algorithm, which enables the cluster formation by interactions among neighbors of CR nodes. It consists of two cascaded phases, which are cluster formation and membership clarification. First, cluster heads are selected according to connectivity vector, which consists of individual connectivity degree and neighborhood connectivity degree. In this phase, common channels between cluster members are guaranteed, and the cluster size is controlled. The second phase is for the

clarification of cluster membership. The process of membership clarification is realized as a congestion game. The debatable nodes, which are overlapping nodes with different clusters, choose the cluster with highest common channels after joining them.

**Affinity Propagation (AP) [11]:** This algorithm applies affinity propagation so that CR nodes are data points and the cluster heads are exemplars. The main aim is to minimize the number of clusters in the whole network. The similarity measure is the common channels shared by CRs. The objective of the clustering is to have as high a number of available channels as possible with other nodes in the cluster. The cluster heads are chosen with a probability that is determined by the node degree of the CRs.

**Spectrum Opportunity Clustering (SOC) [9]:** SOC is a cluster first algorithm. There are three steps for the formation of clusters. In the first step, the nodes know their neighbors and their vacant channels, and they form bicliques, which are a maximum edge biclique and a maximum one-sided edge biclique. The formed bicliques are broadcast to the neighbors, and the best biclique is selected according to largest cluster size or edges in the biclique as the second step. In the last step, the nodes with more than one cluster affiliation are removed. The cluster head is the node with one-hop communication distance with the cluster members.

**Combo [12]:** In this clustering scheme, nodes know their  $k$ -hop neighbors and their corresponding vacant channels. All CRs calculate a minimum number of common channels with their  $k$ -hop neighbors. According to this information, a weight is assigned to each CR for the cluster head selection process. The node with the highest weight in its neighborhood becomes a cluster head. These nodes send membership requests for their clusters. If a node receives more than one request, it selects the one with the highest weight.

Having common idle licensed channels among cluster members is a joint requirement for spectrum-aware clustering protocols in literature. However, they have different approaches apart from common spectrum availabilities in neighborhood while forming clusters.

		Network		Offered features				
Protocol	Approach	Type	Topology	En. eff. <sup>1</sup>	Maintenance	Imperfect sensing <sup>2</sup>	Multi-channel <sup>3</sup>	Mobility
ROSS [10]	Game theory	CRAHN	II	x	x	x	x	x
AP [11]	Affinity propagation	CRAHN	II	x	x	x	x	✓ <sup>4</sup>
SOC [9]	Bipartite graphs	CRAHN	I, II	x	✓	✓	x	x
Combo [12]	Adaptive clustering	CRAHN	II	x	x	x	x	x
CogLEACH [13]	No. of idle channels	CRSN	I, II	✓	x	x	✓	x
DSAC [14]	Groupwise constraint	CRSN	II	✓	x	x	x	x

<sup>1</sup> Energy efficiency; <sup>2</sup> Resilience to faults in spectrum sensing; <sup>3</sup> Support for heterogeneous multi-channel; <sup>4</sup> Supports only low mobility

**Table 1.** Overall comparison of existing clustering schemes in CRAHN and CRSN.

**CogLEACH [13]:** In this clustering method, the expected number of cluster heads is fixed, and the nodes with higher numbers of channels more likely to become cluster heads. According to these conditions, every node is assigned a probability to become a cluster head. Non-cluster-head nodes send join requests to the cluster head with minimum communication cost based on the received signal strength.

**Distributed Spectrum-Aware Clustering (DSAC) [14]:** The DSAC scheme tries to minimize total energy consumption, which is the sum of energy consumed for intra-cluster and inter-cluster communications. The optimal number of clusters is determined according to the average consumed energy. For the distributed algorithm, locally closest pairs are merged for clustering with a group-wise available channel constraint.

Table 1 summarizes the above discussions and gives overall comparison of existing clustering schemes according to the networks and offered features by clustering.

## DISTRIBUTED CLUSTERING IN CRAHNS AND CRSNS

Despite the assumption of clustering scheme existence for spectrum management, medium access control, and routing solutions in the literature, there are not enough clustering studies to satisfy inherent requirements of CRAHNS and CRSNS. To that end, we determine network requirements and clustering design considerations. Afterward, we briefly overview potential solutions for a distributed clustering approach in CRAHNS and an event-driven approach in CRSNS.

### NETWORK REQUIREMENTS

CRAHNS have unique requirements, one of which is managing high fluctuation in spectrum availability due to mobility of CRs and/or PUs. Furthermore, different QoS demands must be satisfied. For instance, multimedia applications require limited delay and lower jitter. Another requirement is limited interference to PUs. If the operating channel change is due to PU activities, there may be interference to the PU, which is undesirable.

There are additional requirements for clustering in CRSNS. First of all, sensor nodes have limited battery power. Hence, the clustering solutions must be energy-efficient. Since clustering requires control signaling for cluster formation and maintenance,

proposed clustering solutions should avoid excessive overheads, which decrease energy levels of the CRs. In terms of cognitive operations, the proposed clustering should avoid frequent change in operating channel since cognitive cycle functions such as spectrum handoff and spectrum sensing consume great amounts of power. Furthermore, the sensor nodes have limited computational energy. Hence, the proposed clustering approaches should be simple. Energy efficiency and low computational overhead are two additional requirements for clustering solutions in CRSNS.

### CLUSTERING DESIGN CONSIDERATIONS

CR operations and distributed network architecture are the main considerations when designing clustering solutions. Design considerations of clustering in CRSNS and CRAHNS differ due to their unique requirements. Hence, we explain common and different design considerations according to the network types as follows.

**Common Design Considerations:** The first common consideration is that there needs to be at least one mutual vacant channel among the formed clusters. The cluster nodes must communicate with each other via common channels.

Imperfections in spectrum sensing are also important since the clustering is performed according to the vacant spectrum bands. The clusters can be formed according to erroneous vacant channel lists of CRs due to poor channel sensing performance. The common method for spectrum sensing is energy detection due to its simplicity [1]. However, this method has imperfections in the sensing process. Hence, the probabilities of misdetection and false alarm are important for the stability of clusters.

Mobility of the nodes highly affects the heterogeneity in spectrum availability, which directly alters the cluster formation. A cluster head may lose connection with its members due to mobility of SUs. Hence, the cluster structure changes, and association and disassociation mechanisms should be designed for the incoming and outgoing nodes in the clusters. Furthermore, the mobility of PUs causes more dynamic spatio-temporal changes in spectrum availability of the SUs.

Maintenance of the clusters is another consideration. Highly changing licensed users' activities increase the cost to preserve the clusters. Due to these dynamic effects, some nodes may leave their current clusters or join another one, which results in packet overhead and energy consumption.



### Design Considerations Specific to CRAHNS:

The flows in an ad hoc network have different QoS levels. This consideration becomes difficult due to activities of PUs. Clustering must take them into account to support different QoS levels.

In order to support better communication quality, another consideration for clustering is heterogeneous licensed channels, which cause different characteristics such as transmission range and bit rate. The channels with less PU arrivals must be utilized in cluster formation to decrease the probability of spectrum handoff, which increases energy consumption.

### Design Considerations Specific to CRSNs:

CRSNs have event-driven communication. The nodes report their observations after detection of an event. If the frequency is low enough, there is no need to maintain clusters after the event since they will not be utilized until the next event. Clustering solutions should consider this unique property of CRSNs.

Energy efficiency is another consideration for CRSNs since the nodes have limited power. Despite the fact that clustering provides energy savings, PU activities may degrade the energy efficiency provided by clustering due to re-clustering and control overhead.

### DISTRIBUTED CLUSTERING APPROACH FOR CRAHNS

The absence of a centralized entity in CRAHNS necessitates cooperation between CRs. Clustering provides hierarchical structure on top of ad hoc networks architecture to improve local cooperation in the network. To this end, we explain possible problems and solutions in a distributed clustering approach for CRAHNS.

There is a general assumption about the existence of a common control channel in the whole network. However, this is quite unrealistic due to PU activities. To make it more realistic, this channel is assumed to be a very narrowband channel, which may get congested easily. Hence, the proposed protocols must not rely on the existence of such a channel. Channel hopping or rendezvous approaches could be adopted to communicate via the same channel to cooperate for the formation of the cluster in the neighborhood. However, this approach has high overhead due to channel switching. A blind rendezvous algorithm is proposed for distributed cognitive radio networks such that communicating nodes do not need a common control channel and available channel information [15]. The proposed algorithm guarantees rendezvous without any need for time synchronization and consumes a short time to rendezvous.

Existing clustering schemes form robust clusters against dynamic available channel variations. Hence, a clustering scheme that maximizes the number of common channels or number of member nodes in clusters should be devised by heuristic algorithms. A balance between the sizes of common channels and cluster members may be established to form robust clusters as in [9]. Apart from the formation of clusters, their maintenance is another issue to be considered in a realistic scenario. Cluster maintenance solutions should adapt to the variations of common channels in the cluster. A cluster head may re-form the cluster with less nodes to achieve common channels. Asso-

ciated nodes should not deteriorate the cluster stability by decreasing the number of common channels.

In addition to the dynamic radio environment, mobility of network nodes makes the cooperation among them more challenging due to connection losses. The proposed clustering algorithms should be mobility-aware. If a cluster head loses connection with its members, this results in re-clustering, which an energy-efficient clustering approach should avoid. To overcome this problem, a node with higher mobility in its neighborhood should not be a cluster head. The nodes may have weight to measure the mobility of the nodes to select the cluster heads in local neighborhoods. By doing this, it is less likely to re-cluster the nodes since the cluster head will not be disconnected from its members. Furthermore, the cluster must manage incoming and outgoing CRs to update cluster memberships for the management of network topology. Radio resource allocation in a cluster is degraded by association and disassociation of nodes due to mobility.

Intra-cluster communication management should also be taken into account due to spectrum mobility. The operating frequency band of the cluster may become occupied; hence, the cluster members should organize intra-cluster communication accordingly to a new vacant channel with limited delay. Due to spectrum handoff, CR nodes consume energy. Hence, the cluster channel with the least PU arrival statistics should be chosen as the operating channel to avoid spectrum handoff. Weighing channels according to PU arrival statistics helps choosing more idle channel for intra-cluster communication.

Existing clustering schemes assume homogeneous licensed channels such that their channel characteristics are the same. However, in a realistic multi-channel CRAHN scenario, their bandwidth and center frequencies may be different. Hence, characteristics of these channels vary. For instance, spectrum sensing results for the licensed channels differ in such a case. Furthermore, the bit rate of the licensed channels become different. The characteristics of PUs on different channels may vary significantly, which results in very vigorous channel availability. If the network requires more coverage, a possible solution to form a cluster is to group neighboring nodes with channels having lower center frequencies.

We outline some of the problems in clustering and their respective solutions and research directions carefully to fulfill the objectives of clustering in a multi-channel dynamic radio environment. However, a holistic clustering solution should be proposed to overcome the problems of CRAHNS.

### AN EVENT-DRIVEN APPROACH FOR CRSNs

CRSNs have event-driven traffic such that the resources are utilized when events occur. Hence, an event-driven clustering approach is shown to be energy-efficient for CRSNs in [5]. Furthermore, this approach solicits clustering in the area between the event and the sink since the nodes located in this region will take part in forwarding event packets to the sink. We explain possible solutions and research directions in a distributed clustering approach for CRSNs as follows.

CRSNs have event-driven-type communication.

The nodes report their observations after detection of an event.

If the frequency is low enough, there is no need to maintain clusters after the event since they will not be utilized until the next event. Clustering solutions should consider this unique property of CRSNs.

Possible clustering solutions should also consider connectivity of clusters. The solutions should arrange cluster-heads so that neighboring cluster-heads can communicate via common channels via single hop. If there is not a common channel between cluster-heads of neighboring clusters, they may communicate via multiple hops in dynamic radio environment.

•The event readings by cluster members are aggregated at corresponding cluster heads by exploiting spatial and temporal correlation between them. Furthermore, the mobility-aware Event-to-sink Spectrum Aware Clustering Protocol (mESAC) [5] considers the mobility of the CR nodes to maintain the clusters. However, a definitive re-clustering procedure is not studied. Maintenance of the clusters during the event should be considered carefully by contemplating the energy constraint of CRSN nodes. The cluster heads may decrease the number of their members to increase the number of common channels to avoid a complete re-clustering. Instead, possible re-clustering solutions should consider partitioning of the nodes locally. Hence, nodes which needs re-clustering may be associated with a neighboring cluster which should located in the direction of those nodes. Association processes should be performed with minimal overhead and should not degrade the number of common idle channels of the associated cluster.

•Fast convergence of clustering structures is one of the most important goals to decrease communication overhead of clustering to transport event readings to the sink. Preference on cluster head or cluster first for designing the clustering algorithm may affect the convergence. Cluster head first algorithms converge faster due to the fact that cluster heads associate with their neighbors to form clusters according to vacant licensed channels by fewer iterations. After determining the cluster heads, they directly form clusters by sending the clustering request to the neighboring nodes.

•Heterogeneous multi-channel is not addressed in the CRSN domain. The heterogeneity causes different channel throughput, communication ranges, and error probabilities. Hence, it affects the clustering performance and energy consumption. Channel switching may occur frequently to use channels becoming idle with better characteristics. Hence, possible clustering solutions must include the channels with fewer PU arrivals and more idle probability, which decreases the possibility of re-clustering.

•Possible clustering solutions should also consider connectivity of clusters. The solutions should arrange cluster heads so that neighboring cluster heads can communicate via common channels via single hops. If there is not a common channel between cluster heads of neighboring clusters, they may communicate via multiple hops in a dynamic radio environment. If the cluster heads directly communicate with each other, it may lead to collisions and interference to the other SUs and PUs due to higher-range communication, and this needs packet overheads to rendezvous on the same channel between two neighboring cluster heads. Multihop communication between cluster heads over member nodes is more efficient in terms of interference to PUs and energy consumption.

## CONCLUSION

This article investigates clustering in multi-channel cognitive radio ad hoc and sensor networks. To this end, we describe how clustering can provide functionalities for different operation regions and explain its benefits. Motivations and challenges of clustering CRAHNs and CRSNs are outlined. Existing solutions for clustering are studied and

compared. Furthermore, we present possible clustering solutions to overcome problems in CRAHNs and CRSNs.

## REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, and K. R. Chowdhury, "CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Ad Hoc Networks*, Elsevier, vol. 7, 2009, pp. 810–36.
- [2] O. B. Akan, O. B. Karli, O. Ergul, "Cognitive Radio Sensor Networks," *IEEE Network*, vol. 23, no. 4, July/Aug. 2009, pp. 34–40.
- [3] M. Ozger and O. B. Akan, "On the Utilization of Spectrum Opportunity in Cognitive Radio Networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 20, no. 1, Jan. 2016, pp. 157–60.
- [4] K.-L. A. Yau et al., "Clustering Algorithms for Cognitive Radio Networks: A Survey," *J. Network and Computer Applications*, Elsevier, vol. 45, 2014, pp. 79–95.
- [5] M. Ozger, E. A. Fadel, and O. B. Akan, "Event-to-Sink Spectrum-Aware Clustering in Mobile Cognitive Radio Sensor Networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 15, no. 9, pp. 2221–33.
- [6] G. A. Shah et al., "A Spectrum-Aware Clustering for Efficient Multimedia Routing in Cognitive Radio Sensor Networks," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 63, no. 7, Sept. 2014, pp. 3369–80.
- [7] Y. Xu et al., "A Cluster-Based Energy Efficient MAC Protocol for Multi-hop Cognitive Radio Sensor Networks," *Proc. GLOBECOM 2012*, pp. 537–42.
- [8] J. Dai and S. Wang, "Clustering-Based Spectrum Sharing for Cognitive Radio Networks," *IEEE JSAC*, vol. 35, no. 1, Jan. 2017, pp. 228–37.
- [9] S. Liu, L. Lazos, and M. Krunz, "Cluster-Based Control Channel Allocation in Opportunistic Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 11, no. 10, Oct. 2012, pp. 1436–49.
- [10] D. Li, E. Fang, and J. Gross, "Versatile Robust Clustering of Ad Hoc Cognitive Radio Network," arXiv: 1704.04828v1 [cs.GT], Apr. 2017.
- [11] K. E. Baddour, O. Ureten, and T. J. Willink, "A Distributed Message-Passing Approach for Clustering Cognitive Radio Networks," *Springer Wireless Personal Commun.*, vol. 57, 2011, pp. 119–33.
- [12] A. Asterjadhi, N. Baldo, and M. Zorzi, "A Cluster Formation Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Proc. IEEE Euro. Wireless Conf.*, 2010, pp. 955–61.
- [13] R. M. Eletreby, H. M. Elsayed, and M. M. Khairy, "CogLEACH: A Spectrum Aware Clustering Protocol for Cognitive Radio Sensor Networks," *Proc. Int'l. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, 2014, pp. 179–84.
- [14] H. Zhang et al., "Distributed Spectrum-Aware Clustering in Cognitive Radio Sensor Networks," *Proc. IEEE GLOBECOM*, 2011, pp. 1–6.
- [15] J. Li et al., "Sender-Jump Receiver-Wait: A Simple Blind Rendezvous Algorithm for Distributed Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 17, no. 1, Jan. 2018, pp. 183–96.

## BIOGRAPHIES

MUSTAFA OZGER [M'17, S'12] received his B.Sc. degree in electrical and electronics engineering from Middle East Technical University, Ankara, Turkey, in 2011, and his M.Sc. and the Ph.D. degrees in electrical and electronics engineering from Koc University, Istanbul, Turkey, in 2013 and 2017, respectively. Currently, he is a postdoctoral researcher at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. His research interests include wireless communications and the Internet of Things.

FATIH ALAGOZ is a professor in the Computer Engineering Department of Bogazici University. He obtained his B.Sc. degree in electrical engineering in 1992 from Middle East Technical University, Turkey, and his D.Sc. degree in electrical engineering in 2000 from George Washington University. His research areas include cognitive radios, wireless networks, and network security.

OZGUR B. AKAN [M'00, SM'07, F'16] received his Ph.D. degree in electrical and computer engineering from the Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta in 2004. He is currently with the Electrical Engineering Division, Department of Engineering, University of Cambridge, United Kingdom, and also the director of the Next-Generation and Wireless Communications Laboratory in the Department of Electrical and Electronics Engineering, Koc University. His research interests include wireless, nano, and molecular communications, and the Internet of Everything.

# 北京邮电大学

## 本科毕业设计（论文）开题报告

学院	信息与通信工程学院	专业	通信工程	班级	201421118
学生姓名	李孟辉	学号	2014210506	班内序号	04
指导教师姓名	郭文彬	所在单位	信通院	职称	教授
设计（论文）	（中文）认知无线电系统组网研究				
题目	（英文）Research on cognitive radio adhoc networking technology				

毕业设计（论文）开题报告内容：（主要包含选题的背景和意义；研究的基本内容和拟解决的主要问题；研究方法及措施；研究工作的步骤与进度；主要参考文献等项目）

### 1、选题背景及意义与文献综述

随着无线接入设备的便捷化与无线通信技术本身的快速发展,21 世纪以来的无线接入设备进入了爆炸式增长阶段。虽然无线接入设备可以无限制作但是无线频谱资源始终是有限的,两者之间的矛盾也随着无线通信技术的加速发展与当下大数据时代数据量的激增而愈发严重。而且随着无限局域网的发展,越来越多的用户使用无线局域网的方式接入,与专门分配给无线电视,广播业务的、不允许其他业务使用的频段不同,这些频段都是非授权频段。这就导致了授权频段使用效率低下而使得整个频谱资源的利用率下降,然而自由频段却是十分拥挤,无形之中浪费了大量的频谱资源。

为了解决频谱资源利用率低的问题,联邦通信委员会(FCC)提出了新的频谱管理和分配策略,动态频谱接入(Dynamic Spectrum Access , DSA)技术也受到了广泛的认可与重视,认知无线电技术也被认为是解决这个问题最有前景的技术。

认知无线网络是认知无线电与自组织网络的结合,各个次用户可以通过频谱感知寻找频谱空穴(处于授权频段),由于主用户(授权用户)活动的多样性,次用户需要在侦测到主用户活动时进行跳频避开主用户业务,同时维持次用户间通信的进行,因此认知无线电的组网成为了研究的重点,也是解决认知无线电实际应用的节点。

实现认知无线电的自组网需要经过节点交汇,拓扑建立,信道选择,路由选择,信息传输几个阶段。

#### 1.1 节点交汇与拓扑建立

传统的认知网络使用中心控制结构,依靠控制中心,例如基站,基站可以辅助认知无线电设备发现临近的用户与接入节点,不断的更新临近用户的信息,在本地网中以无线自组网的方式建立与接收节点的通信路径,能够通过基站建立与其它本地网接收节点的单点与多点通信。这种方法虽然不需要认知无线电终端清楚网络拓扑与其他用户的详细信息,但是并不具备移动有效的功能架构而且对于控制中心的要求高,整个网络受制于控制中心的地理位置。认知的网络的节点交汇是使用公共控制信道完成组网的初始化,

次用户的信道交汇分为盲信道交汇策略（跳频交汇）以及有辅助信道交汇[16]，前者又可以分为四类[6]

### 1. 基于面向接收者的交汇策略

在传统多信道无线网络中，选定一个通信控制信道时如果要求多个节点同时进行通信几乎所有的节点数据都无法正确接收，所以研究者以有限信道为背景提出了一类就接收者导向或以接收者为中心的传输策略解决信道交汇问题。接收者导向传输（receiver-directed transmission, RDT）[1]提出每个用户部署一个静默信道，当不进行传输时始终维持在这个调制信道频率点等待接收，当需要发送数据时发送节点（假设已知接收节点的静默信道频率）将会将传输信道调制到接收节点的静默频段完成节点间的交汇。在文献[2]中基于多信道通信提出了一个新的链路层协议。为了增加每个节点的吞吐量，链路层协议要求每个认知无线电用户配备两类接口来同时完成发送与接收，其中一个接口（fixed）维持 RDT 的静默信道完成接收而其他的接口（switchable）可以同时进行调频完成发送。

但是 RDT 首先需要解决的问题便是如何确保其他邻居节点知道节点的静默信道消息，文献[2][4]中提出每个节点间隔 5s 在每个信道上发送 HELLO 数据包，此数据包包含节点固定使用的信道以及它当前的邻居表（neighbor table），节点接收到邻居节点发送的 HELLO 数据包后更新自己的邻居表，这样可以确保信道使用表（channel usage list）中包含两跳需要的使用信息，从而确保使用的信道分散到所有可用频道上，避免由于信道过于接近导致的节点间干扰。不过这种广播协调方法要求节点在所有信道上发送 HELLO 信息包，效率十分低下。所以在文献[3]中提出了一个新的静默信道认知方法：

（Accessible Channel-based Selection，ACS）。文献中舍弃直接存储邻居节点的静默通道，而是存储邻居节点的可用信道（set of accessible channels, SAC），由于不同邻居节点的位置或者运行模式，邻居节点的 SAC 很大可能是不同的，每个节点都拥有存储 SAC 信息的数据库，数据库的单元由时间戳和 SAC 信息构成，根据时间戳的前后更新自己的 SAC 数据库，当发送节点与接受节点互换 SAC 信息后，更新 SAC 数据库，以自己的 ID 在 SAC 中进行随机算法决定自己的静默信道，如果节点 i 要向节点 j 发送信息，如果在节点 j 的 SAC 信息不为空的时候，代入节点 j 的 ID 作为随机算法种子进行随机进程，求出 j 的静默信道后调频尝试连接。这种受控制的随机算法，得益于实时性极高的数据库同步增大了信道交汇得成功概率。文献[5]中提出了一种信道交汇算法 ROP（rendezvous with near-optimal performance）与优化版 FROP(fast rendezvous with near-optimal performance)来完成多点间最优交汇性能与最大网络吞吐量。假设每个节点已知可用信道数量以及邻居节点总数，发送节点利用随机算法生成一个序列表示所有邻居节点的状态：1.被动状态，在静默信道监听 2.主动状态，准备调频进入另一个接收节点的静默信道，次随机算法保证所有节点状态的对半分布即序列的和为总节点数的 1/2，之后的算法同文献[3]，不过增加时槽 t 作为第二个随机种子。如果遇到多个主动节点同时选择个被动节点，那么将会在所有的主动节点中选择一个作为发送节点，例如选择一个 ID 最大的节点，而其他节点通过此信道接收到占用状态信息之后则会重新进入选择



被动节点的状态；当主动节点发现被动节点并非想要的接收节点时同样也会进入重选状态；当发现被动节点信道存在流量时，同样进入重新选择状态，即不管发生什么，都会使主动节点回归原始状态，当选择了所有的被动节点还尚未完成传输时，停止选择过程。通过重复迭代使得每一个发送端对应一个接收端，整个网络的吞吐量达到最大，拥塞性能最高。以上的算法解决了网络中的多节点交汇的问题，但是单根天线依然无法同时维持两种行为的进行，所以依然面临着盲问题的困扰。

## 2.基于信号处理策略

区别于分配大量的频带资源给公共控制信道的有辅助的信道交汇策略，此方法并不会降低公共控制信道频带范围的频带利用率。目前，将 CR 与超带宽（Ultra-wideband, UWB）技术结合已经成为了热门的研究方向[7]。文献[8]中论证了 UWB 在实际环境中结合 CR 技术的可行性，文献[9]初步论述了通过 UWB 建立 CCC，方法依然是通过广播 HELLO 的信息发送自身的 ID，地理位置等信息完成节点的交汇，并且提出了在此方案下的拓扑发现与建成数据链路的方案，证明了使用 UWB 可以在百米范围上实现良好的链路连接，并具有优良的传输码率，不过 UWB 性能会受到窄带传输的干扰。文献[8]提出了一个解决窄带干扰的方案，验证了一定条件下在可见视野范围内实现 IR-UWB 是可行的，在同一个认知无线电技术站安装并存 UWB 与 NC-OFDM 技术，在窄带频域仅使用 NC-OFDM 可以有限减轻极窄带传输的干扰。

不连续的正交频分复用（NC-OFDM）得益于子载波的不连续性，可以在主用户使用频段将与之重叠的子载波置零，对应的调制方法即在常规的 OFDM 调制的 IFFT 与 FFT 端将某些抽头置零，从而不影响主用户使用授权频段，同时也具有常规的 OFDM 频谱效率高，抗多径干扰的特点。文献[10]中提出了 NC-OFDM 的交汇策略，去除掉主用户的使用频率即禁用子载波，在每个子载波上发送脉冲信号，通过类似 HELLO 机制传输必要的本地信息，若接收到节点之间脉冲信号则将 CCC 信道调频到相应信道上进行组网与控制信息传输。由于无线信号的传播并非只有视距内传播，还有多种复杂地形与环境下的传播，OFDM 信号在复杂环境下必然会发生相位，幅度与频率失真，所以接收机必须考虑信道的状态才能进行正确接收，此时信道估计是此策略的重要内容。根据信道估计资源不同，OFDM 信道估计可以分为：基于判决的信道估计，导频辅助信道估计（pilot symbol assisted modulation, PSAM），盲或半盲信道估计，其中的 PSAM 信道估计最为成熟且易于工程实现。文献[11]中提出了适用于 NC-OFDM 的压缩感知的信道测量方案（CS），相比于禁用某几个子载波与不同宽度的窄带干扰下可以获得更高的信道估计性能。文献[12]介绍了单天线 PASM 方法下的导频图像设计方案与两种导频信息估计算法：LS 与 MMSE 的原理与优缺点，并提出了 LS 算法中对低精度 LS 估计器结果的降噪处理方法：块平均降噪，时间遗忘降噪与修正 IDFT 变换域降噪[13]，在获得导频信息条件下，通过二维维纳滤波算法或者一维内插算法获得完整的信道估计。为了最大程度的提高信道容量，文献中提出了 MIMO NC-OFDM 系统，并给出了相关导频图像设计，IDFT 变换域降噪与信道估计算法的仿真性能。不过文献中需要插入大量导频信息以至于浪费了很多频谱资源，而且在系统异步的情况下系统性能会下降，这与实际使用环境

是不相符的。

出于自私的角度考虑，大部分的主用户肯定是想要使用最少的信号功率完成与通信站的交互，NC-OFDM 在对主用户进行频谱感知时候，次用户会因为距离不同等因素的影响感知到不同的可用信道，由于两者的可用信道不同，会使得多次向不可用信道发送消息浪费功率，而不能像 UWB 中 SAC 算法一样确定两者的取值范围，我认为这也是 NC-OFDM 的问题吧。

### 3.基于信道跳变序列策略

CH-BASED 策略是目前最为火热的研究方向，因为认知无线电设备本身具有优秀的调频能力，制定调频序列“像”是解决交汇问题最为直接简单的方案。文献[14-15]提出了通过信道跳频 Slotted Seeded Channel Hopping (SSCH)，文献[16]提出了调频扩频技术 (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) 实现 CR 的信道交汇。SSCH 要求调频通信实现：1.节点跳频到相应信道并进行数据包的传送 2.在信道中传送自身的邻居表以及地理信息等重要信息 3.依据接受到的数据包更新邻居表。SSCH 将同时传送的信息分布在不同的正交频带内，极大的增加了网络的流量。

文献[14]中介绍了基于信道跳变序列则是分为两类：同步信道跳变序列策略与异步信道跳变序列策略。

异步信道跳变序列策略。文献[14]中介绍了认知无线网络中基于信道跳频序列的异步交汇算法，将其中的信道跳频序列的产生方法分为三类：伪随机 (pseudorandom)、基于排列 (permutation-based) 和基于 Quorum 方法

基于伪随机 (pseudorandom)

1.随机算法：随机算法：每个节点在  $M$  个可用信道上调频，那么两个节点成功交汇的概率为  $1/M^2 * M = 1/M$ 。但是考虑到纯随机算法会导致长时间的交汇尝试，所以应该采用可控制的伪随机算法进行交汇。文献[16]考虑了一种基于素数的步进序列进行调频 (MC)，假设  $M$  为节点总数， $N$  为小于  $M$  的素数，选择步长  $K$ ，每次已步长调频，得益于素数的模特点，如果时间超过  $2N$  则重置此过程。后续针对 MC 的优化算法 MMC 减少了 MTTR， $N$  可以在  $[M, 2M]$  之间随机选择一个素数，超过  $2N^2$  重置此过程，步长则是随机选取。

不过这两种算法并不能完全避免出现  $MTTR = \infty$  的问题，性能可能出现比较纯随机还要差的情况。

2.基于 jump-stay 算法：文献[17]中首次提出了 Jump-Stay 算法，其基本思想是：每个用户都分为跳跃模式 (jump pattern) 与保持模式 (stay pattern)，在跳跃模式下用户进行调频而在保持模式下保持跟随状态不惊醒调频，CH 序列正是通过包含着这两种模式的循环 (JSHopping 函数) 产生。文献中原始算法描述如下：

1: Input:  $M, P, r_0, i_0, t$

Output: channel  $c$

$t = t \% 3P$ ;

IF ( $t < 2P$ )  $i = (i_0 + tr_0 - 1) \% P + 1$ ; //jump pattern

```

ELSE i=r0; //stay pattern
END
IF (i>M) i=i%M+1; END //remapping
RETURN c=ci;

```

输入  $M$  (可用信道总数),  $P$  (不小于  $M$  的素数),  $i_0$  (每一段信道跳频序列的初始信道标号),  $r_0$  (步长), 当  $t < 2p$  时, 则  $i = (i_0 + tr_0 - 1) \% P + 1$ ,  $t > 2p$  时保持 stay 即维持在  $r_0$  频道上, 当  $t > M$  则  $i = i \% M + 1$  重新进入之前的运算, 输出的 channel  $c$  即为所求。在此基础上针对对称与不对称 (每个节点感知到的可用信道情况) 设计 JS-SM 与 JS-AM, 作者验证了算法的仿真结果都要优于 MC 与 MMC 在相同条件下的性能。在 2017 年 Zifan Li 针对 JS 算法进行了优化与扩展[18], Li 提出了增强算法(Enhanced Jump-Stay, EJS), Random Enhanced Jump-Stay (REJS), Extended Enhanced Jump-Stay (EEJSa) (算法在对称条件下性能较差), Extended Random Enhanced Jump-Stay (EREJSa), Enhanced Jump-Stay to Channel  $n$  (EJSn), 作者通过仿真比对了以上的五种算法, 验证了在对称以及不对称的情况下 REJS 都具有更加优良的性能, 并且具有 JS 的除去 MTTR 上限不存在的问题的功能, 弥补了 EJS 在不对称情况下性能较差的问题。

基于排列 (permutation-based)

1. 文献[16]提出了 Generated Orthogonal Sequence-Based Algorithm, GOS, 具体算法是将  $M$  个可用信道进行排列组合, 每个组合都重复  $M+1$  次, 算法可以保证在对称式网络中两个 CR 用户在  $M*(M+1)$  时隙内完成交汇。

2. 文献[19]提出了利用 triangular numbers 与循环移位序列相结合的 CRSEQ 模型。其中  $T_n = n*(n+1)/2$  ( $n$  为整数), 循环移位序列 SEQ 具有  $k$ -shif-trendezvous 属性, 算法的详细构造过程: 构造一个循环移位序列, 同上文假设所有节点统一可用通道数量为  $M$ , 选择不比  $M$  小的最小素数  $N$ , 构造一个  $N*(3N-1)$  的序列, 计算每个子序列  $S_i$  对应的 triangular numbers, 每个序列的元素由

$$\begin{aligned}
 ai = & \\
 & z \bmod N + 1, \text{ for } 0 \leq y < 2N - 1, x \bmod N + 1, \text{ for } 2N - 1 \leq y < 3N - 1 \\
 & z = (x(x+1)*2 + y) \bmod N, x = i/(3N-1) \\
 & y = i \bmod (3N - 1) \\
 & 0 \leq i < N(3N - 1)
 \end{aligned}$$

进行计算, 算法在没有时间槽同步的状况下最大 TTR 为  $N*(3N-1)$ , 保证了 CRSEQ 策略的 ETTR 与 MTTR。不过此算法同样也会出现  $TTR = \infty$  的情况, 算法假设  $N \geq 2$ , 在  $N=2$  的情况下, 如果两个节点的差距为  $10-2*2=6$  的时候, 永远无法完成信道交汇, 此情况下  $TTR = \infty$ 。在  $N$  比较大的条件下, 构成的序列长度  $(3N-1)$  同样会增长且总体元素数目是以  $N^2$  的幂函数形式增长, 在可用信道数目较多的环境下, 构成的信道长度过长会增大交汇时延。

3. 文献[20]介绍了 BALANCED INCOMPLETE BLOCK DESIGN 在 ad hoc 网络中的模型, 算法思想是: 将  $v$  的不同对象排列成  $b$  块, 每个块包含确切的  $k$  个不同的对象, 每

个对象发生在完全不同的  $r$  块，每一对不同的对象发生在  $\lambda$  个不同的块里，这 5 个参数  $v, b, r, k, \lambda$  满足：

$$bk = vr$$

$$r(k - 1) = \lambda(v - 1)$$

使用此方法对应的握手机制是双方各自发送 Request to Send (RTS)以及 Clear to Send (CTS)完成交汇，在发生异步的条件下会出现下图中的情况：即使有细微的异步也可以保障完成信道交汇。文献中讨论了在单序列与多序列的条件下此协议都可以成功完成交汇并且可以公平分配负载，同时与 triangular numbers 算法类似，两者的序列都具有循环移位性质，所以可以保证 TTR 的有限上限需求。

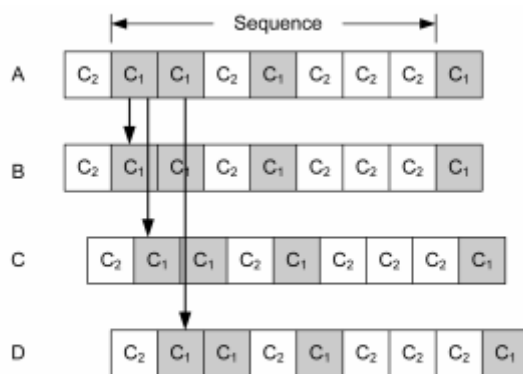


Fig. 2. Asynchronous BIBD Example

不过此算法同样还是需要构建很长的序列，这增大了交汇时延与设备的硬件要求，而在多序列的条件下也有可能发生错误匹配的状况，这涉及到了如何识别正确的发送方与接收方的问题。

4.2017 年 Xuesong Jonathan Tan 提出了 UDDS-ACH 序列构造方法，使得 MCTTR 接近 CRSEQ 与 MACH 这两种经典序列，并且在非同步的条件下获得了更优秀的吞吐量。

#### 4.基于 Quorum

Quorum 系统的基本定义：定义一个集合  $U=\{1, 2, \dots, N\}$  中含有  $n$  个元素，Quorum 系统  $S$  是  $U$  的一系列非空集合且满足  $p \cap q$  不为空集,  $\forall p, q \in S$ . 其中的每个  $p$  是一个 Quorum。

文献[21]提出了一个不需要全局时钟同步的异步 QCH 系统。分析和仿真结果表明，这种跳跃方案在各种网络条件下优于现有的方案。构造方法如下：

Input:  $N, k, R = \{h_0, h_1\}, U = \mathbb{Z}_k$ , and two cyclic quorum systems  $S$  and  $S_0$  over  $U$ .

Output:  $Q$ .

1:  $Q = \emptyset$ .

2: for  $j = 0$  to  $(|S| - 1)$  do

3:     for  $i = 0$  to  $(k - 1)$  do

4:         if  $i \in B_j$  then

```

5:         ui = h0.
6:         else if  $i \in B0j$  then
7:             ui = h1.
8:         else
9:             ui = h randomly chosen from  $\{0, ..., N-1\} \setminus \{h0, h1\}$ 
10:        end if
11:    end for
12:  $Q = Q \cup u$ .
13: end for

```

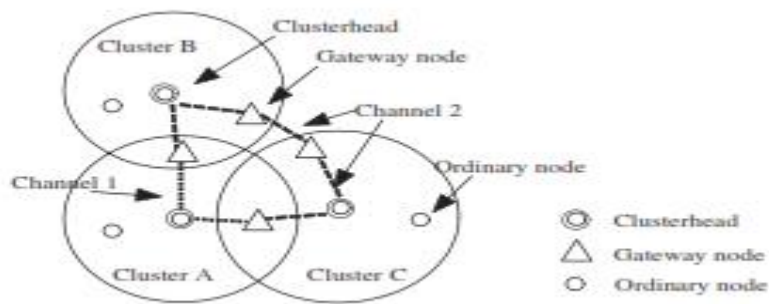
生成序列同样具有循环移位封闭性质，因此适合在异步网络上使用，得益于 Quorum, A-QCH 的 MTTR 与 ETTR 具有良好的性能。

基于调频序列的信道交汇策略可以使信道交汇在有限时间内尝试所有经过人工计算后的信道，规模有限而且 TTR 有穷，不过再增加效率依然难以实现直接调频到相同信道进行通信。这种信道交汇策略比较适合在一些动态性不高的环境中使用，在多点通信的情况下，如果认知无线网络内部的节点数目较多，主用户活动十分活跃，地理位置与功率等条件变化频率过高，每次进行信息交汇时需要不断更新邻居表以及可用信道信息，即使是在系统不复杂的条件下也会出现显著的时间开销，这对一些实时性要求较高的网络具有不利影响，而且从安全性方面考虑，由于每个信道序列都是人为的算法加上实时信息为种子计算而成，所以若是算法被知晓，那么整个无线网络都能被实时监测。虽然是当前研究的热门方向，不过优秀的交汇算法的数目不多而且针对物理层的安全策略十分稀少，这都是目前需要解决的问题，如果可以将跳频序列根据传输概率分配到不同的用户端，或者有实时策略从而每个用户不进行全序列运算有可能也是解决方案。而且已经有文献指出基于分组策略可以获得比调频序列更好的性能。

## 5. 基于分簇/分组策略

### 分簇策略

分簇是无线网络最常用的以分层结构组织邻居范围内用户的方法，一个纯粹的分布式控制方案，如载波感应多重存取/避碰(CSMA/CA)可能不起作用，因此将集群的概念引入网络。一个节点在一个通道上形成一个集群，并邀请相邻的节点共享同一个通道来加入它的集群。为了方便起见，集群的控制通道称为该集群的主通道。形成集群的节点成为集群头，负责集群内通道访问控制和集群间通信，由它选择簇内所有次用户共有的可用信道作为实现簇内协调的交汇信道。通过协商集群之间的网关节点，集群可以连接到一个大型网络中。网关节点是一个集群的成员，它能够到达其他集群的成员。总体结构如图：



A,B,C 三个簇可以通过 gateway node 节点实现互联[21]。

### 簇（集群）的形成

节点的主机集群是节点所属的集群;节点的相邻集群是节点不属于的集群,但它的成员有一跳邻居;集群中所有成员的所有邻居集群称为集群的邻居集群。

假设在一个 CRN 动态变化较慢,环境相对稳定的条件下,节点间互相交换邻居信息,初始阶段节点可能知道一跳的部分邻居节点的信息,随着节点逐渐地根据所提出的邻居发现算法收集到更多的邻居信息,集群被重构并连接到一个更可靠的网络结构中。文献[21]中介绍了实现此策略的 MAC 层协议。对于每个集群,通道访问时间被划分为一个超级帧序列。每个超帧包括 5 个主要周期,它包含集群的时间同步、控制和资源分配信息。它被分成若干固定长度的小时间。集群中的每个成员占用一个小槽,并使用它来广播其标识和一跳邻居列表。邻居列表中的条目包括邻居的标识和它的通道列表。这将会产生一个邻居的主通道在集群列表,通过它,节点可以确定如何到达邻居集群,之后便是数据通道建立,在此期间,如果传输会话使用不同的信道,则允许并行传输。在数据周期之后,集群成员将使用集群内随机访问周期(random access period , RAP)来交换控制消息。结束这个超级帧之后,不会持续进行控制信息交换,而是进入一个频谱黑洞检测区段,每个节点开始频谱感知寻找频谱黑洞。

簇的形成过程:当节点想要加入网络时,它首先检测可用的通道。然后,它扫描其中一个频道,在一定的时间内,在那个频道上等待信标。该节点从最低的频带通道开始扫描过程,该信道被称为最低信道。等待扫描的间隔需要大于超帧的时间,这样可以保证肯定可以获得信标。扫描间隔分为三个情况:没有消息到来;收到信标;收到邻居信息但是没有获得信标。第一种情况下该节点变为簇头,第二种情况下节点申请加入集群,该集群的簇头为它分配一个时间槽,如果时间槽不够则拒绝该请求。此时该节点将会重置最低信道扫描过程,寻找其他的集群以加入,如果所有集群都满了则将自己作为簇头;第三种情况下说明该节点拥有邻居集群,节点此后记录邻居信息,并通过相应的邻居集群的公共 RAP 尝试与该邻居交换邻居信息。在此之后,它将继续在下一个可用通道上进行扫描。如果节点在遍历所有通道后无法找到满足情况 1 和 2 的通道,那么它将在随机选择的情况下启动自己的集群。通过此过程形成多个簇。簇之间利用自己的 RAP 交换信息来完成大网络的建设。

分簇策略对簇内的同步要求较高,如果簇内同步出错将会使得信息交换效率低下,而且单跳的结构会由于簇头的随机产生导致管理开销的增加,而且安全新方面,由于是成簇的交换,交汇信道被主用户占用后将会导致重置控制进程,产生巨大的开销,所以仍需要解决安全性问题。

#### 分组策略

文献[22]提出了分组策略,通过邻居发现算法获得邻居可用信道列表与邻居得邻居可用信道列表信息,根据相似算法形成协调组,组内使用一个统一的信道进行控制信息以及数据的交换,此信道的产生需要不断的投票迭代,即每个用户广播自己投票的最大连通性的信道,并不断根据收到的邻居投票信息更改自己的最大连通性信道。

文献[23]中提出了基于分组的多节点交汇方法,类似于跳频序列策略,用户根据概率执行主跳频模式与从跳频模式,描述了在分组网下拓扑发现算法。分簇和分组方式同样依赖广播信息,在多个信道扫描信标或者邻居信息都会浪费功率与时间,而且分组方式使用的是不同的交汇信道,组与组的信息传递也是需要解决的问题。

以上这些策略为解决两个节点到多个节点之间的信道交汇问题提供了解决方案。盲信道交汇策略优点在于每个数据都是在两个节点之间的认知信道中传输,但是需要以双方在调频的条件下建立认知信道,这无疑会同时增加系统的复杂性与硬件成本。后者从本就有限的频谱资源中分配控制信道频率是与认知无线电精神相违背的但也拥有者更低的复杂度。

目前的多节点则是点对点盲信道交汇策略的整合,通过用户端的信道列表或智能同步选择公共的控制信道频率,实时完成多节点的组网。不过依赖 CCC 的信道需要次用户有着良好的频谱信息,意味着每个认知无线电终端需要具备完整的认知无线电功能,增加了硬件要求。

### 1.2 路由协议

由于认知无线电系统可根据周围环境的变化动态地进行频率的选择,而频率的改变通常需要上层协议如路由协议等进行相应调整。

文献[24]提出了基于本地频谱知识的最小通道开关路由协议(MCSR),SU 节点使用公共控制通道来传输 RREQ 和 RREP 包,以及 PU-UC(PU 通道更新)和 RERR(路由错误),分别作为路由发现和维护的一部分。当 SU 需要对目的 SU 发送数据时,则会广播 RREQ 包,包中包含路径信息与首选 PU 通道信息,当目的 SU 收到 RREQ 包之后就会根据接受到的路径节点来计算权值,使用相同首选 PU 信道的相邻节点路径权值为 0,其他则为 1(通过减少路径上节点的调频尽可能减少路径时延),选择一条权值和最小的路径作为传输路径,然后发送包含 RREQ 包中的路径节点与首选 PU 信道的 RREP 包,在接收到 RREP 包之后开始进行数据传送。传送过程中如果由于 PU 的活动造成信道的改变,并且在路径上没有公共的首选 PU 通道时,则会由上游节点通知源节点路由已经断开发 RERR 错误信息。

文献[25]中引入了评价认知无线网络下的路由性能的因素:

#### 1. 路径上的节点数目

2. 当因为主用户活动导致信道不可用会导致数据包被废弃,所以应该考虑信道不可用的频率

根据这两个新的指标文献中提出了两种新的路由协议

**Routing based on minimum latency:**通过获得的拓扑信息来权衡由于节点上下游的交汇信道不同而造成的跳频时延与路径跳数之间的关系从而获得最小的时延即有效性。

**Routing based on frequency of channel switches over links:**每个节点维护自己的信道通路时间的均值,从而获得各个信道的可用概率。每个节点都选择可用概率最高的信道传输从而获得最高的可靠性,不过由于这样做会导致跳数的增加而且没有考虑跳频时间,所以降低了传输的有效性。以上两个路由协议需要结合使用。

由于认知无线电的路由研究还处于初级阶段,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。

## 2、研究内容与拟解决的主要问题

此次毕设主要解决的问题是基于盲信道交汇分组策略下如何实现认知无线电用户的信道交汇与组网,由于目前的热门信道交汇研究方向是基于跳频序列策略的组网,对于分组策略的研究还较少,而且也有论文指出分组策略在特定环境下性能优于调频序列策略,分组策略对于多用户的通信解决有着天然的优势,而且跳频策略如何根据不同环境选择不同的算法定制不同的序列依然没有得到有效解决,所以选择使用分组策略进行实验仿真。参考分簇方法给出认知自组网的组网策略及协议设计,给出相关性能分析。

## 3、研究方法初步方案

了解前沿技术中关于分组策略的研究,分析论文中相关的算法,协议,策略等内容,学习协议设计与改善,完成设计的仿真与性能分析。

## 4、研究工作的进度安排

- 1、2017 年 12 月-2018 年 3 月,文献阅读与综述报告完成;
- 2、2018 年 3 月-2018 年 5 月,完成认知无线自组网建模与仿真分析。
- 3、2018 年 5 月-2018 年 6 月,完成论文撰写

## 5、参考文献

- [1]. NACHUM SHACHAM , PETER J. B. KING. Architectures and Performance of Multichannel Multihop Packet Radio Networks .IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. SAC-5, NO. 6, JULY 1987 :1013-1024
- [2]. Pradeep Kyasanur , Nitin H. Vaidya. Routing and Link-layer Protocols for Multi-Channel Multi-Interface Ad Hoc Wireless Networks . Mobile Computing and Communications Review, Volume 1, Number 2 . January 2006 :1-13
- [3]. Chunsheng Xin, Xiaojun Cao. A Cognitive Radio Network Architecture without Control Channel, GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference, 30 Nov.-4 Dec. 2009:1-6



- [4]. 刘玉涛. 认知无线电中的原始用户检测. 哈尔滨大学电子与信息工程学院: 2007
- [5]. ChunSheng Xin, Min Song ,Liangping Ma , Chien-Chung Shen. ROP: Near-Optimal Rendezvous for Dynamic Spectrum Access Networks. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 62, NO. 7, SEPTEMBER 2013:3383-3391
- [6]. 刘权,赵光胜,王晓东,周兴铭. 认知无线网络信道交汇研究综述. Journal of Software,2014,25(3):606-630
- [7]. 郭彩丽,张天魁,曾志民,冯春燕. 认知无线电关键技术及应用的研究现状. 电信科学 2006 年第 8 期,2006.8:50-55
- [8]. Michael Doring, Anatolij Zubow ,Adam Wolisz. Feasibility Study on Application of Impulse-UWB for Control Channel in Cognitive Radio Networks, 2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). 14-17 June 2015:1-6
- [9]. Ahmed Masri, Carla-Fabiana Chiasserini, Alberto Perotti, Control Information Exchange through UWB in Cognitive Radio Networks, 2010 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC). May 2010:111-116
- [10]. Chin-Jung Liu, Pei Huang, Li Xiao, Efficient NC-OFDM-based Control Channel Establishment in Cognitive Radio Networks, 2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Oct. 2016: 28 – 36
- [11]. 何雪云, 宋荣方,周克琴. 认知无线电 NC-OFDM 系统中基于压缩感知的信道估计新方法.通信学报第 32 卷第 11 期. 2011 年 11 月:86-94
- [12]. 张世昌 . 认知无线电系统中的 NC-OFDM 信道估计技术研究. 电子科技大学:2009
- [13]. 王军, 李洪宇, 张世昌, 李少谦. 基于修正变换域降噪的 NC-OFDM 信道估计算法. 电子科技大学学报第 38 卷第 5 期,2009 年 9 月
- [14]. 孔得凯 吴克宇 韩方景 韩方剑. 认知无线网络中基于信道跳频序列的异步交汇算法研究,计算机工程与科学第 36 卷第 10 期,2014 年 10 月:1873-1879
- [15]. Victor Bahl, Ranveer Chandra, John Dunagan. SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping For Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad Hoc Wireless Networks, MobiCom Philadelphia, Pennsylvania, USA, Sept. 26-Oct. 1, 2004:1-15
- [16]. Nick C. Theis; Ryan W. Thomas; Luiz A. DaSilva. IEEE Transactions on Mobile Computing Volume: 10, Issue: 2. 25 March 2010:216-227
- [17]. Z. Lin, H. Liu, X. Chu and Y. W. Leung, "Jump-stay based channel-hopping algorithm with guaranteed rendezvous for cognitive radio networks," 2011 Proceedings IEEE INFOCOM, Shanghai, 2011, pp. 2444-2452.
- [18]. Z. Li and D. J. Thunte, "Extensions and improvements of jump-stay rendezvous algorithms for Cognitive Radios," 2017 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT), Avignon, 2017, pp. 1-8.
- [19]. J. Shin, D. Yang and C. Kim, "A Channel Rendezvous Scheme for Cognitive Radio Networks," in IEEE Communications Letters, vol. 14, no. 10, pp. 954-956, October 2010.

- [20]. M. Altamimi, K. Naik and X. Shen, "Parallel Link Rendezvous in Ad Hoc Cognitive Radio Networks," 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010, Miami, FL, 2010, pp. 1-6.
- [21]. T. Chen, H. Zhang, G. M. Maggio and I. Chlamtac, "CogMesh: A Cluster-Based Cognitive Radio Network," 2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, 2007, pp. 168-178.
- [22]. Jun Zhao, Haitao Zheng and Guang-Hua Yang, "Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks," First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005., Baltimore, MD, USA, 2005, pp. 259-268.
- [23]. 洪一诺. 认知无线电自组网中多点组网的算法优化与实现. 北京邮电大学信息与通信工程学院: 2017
- [24]. N. Meghanathan and M. Fanuel, "A Minimum Channel Switch Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks," 2015 12th International Conference on Information Technology - New Generations, Las Vegas, NV, 2015, pp. 280-285.
- [25]. S. Krishnamurthy, M. Thoppian, S. Venkatesan and R. Prakash, "Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks," MILCOM 2005 - 2005 IEEE Military Communications Conference, Atlantic City, NJ, 2005, pp. 455-460 Vol. 1.

指导教师签字		日期	年 月 日
--------	--	----	-------

# 北京邮电大学

## 本科毕业设计（论文）中期进展情况检查表

学院	信息与通信工程学院	专业	通信工程	班级	2014211118
学生姓名	李孟辉	学号	2014210506	班内序号	04
指导教师姓名	郭文彬	所在单位	北京邮电大学	职称	教授
设计（论文） 题目	（中文）认知无线电系统组网研究				
	（英文）Research on cognitive radio adhoc networking technology				
目前 已 完 成 任 务	<p>主要内容：（毕业设计（论文）进展情况，字数一般不少于 1000 字）</p> <p>选题主要任务以及目标：</p> <p>认知无线电通过感知频谱环境，自适应调整通信的方式，达到有效利用空闲频谱资源的目的，从而缓解无线资源紧张的矛盾。由于认知用户是非授权用户，如何实现认知多用户之间的组网问题是认知自组网的关键问题。本课题研究认知自组网的组网策略及协议设计，给出相关性能分析或仿真。</p> <p>选题主要内容</p> <p>1. 文献阅读与课题综述报告</p> <p>通过文献检索与阅读，给出认知无线自组网中多用户组网的研究现状分析报告。</p> <p>2. 针对认知自组网中多用户组网建模，研究不同场景下多用户组网的策略，给出理论或仿真分析。</p> <p>选题进度安排</p> <p>1. 2017 年 12 月-2018 年 3 月，文献阅读与综述报告完成；</p> <p>2. 2018 年 3 月-2018 年 5 月，完成认知无线自组网建模与仿真分析。</p> <p>3. 2018 年 5 月-2018 年 6 月，完成论文撰写</p> <p>目前完成的主要内容：</p> <p>1. 根据选题的第一步要求，已经完成了课题综述报告的撰写，综述报告中主要阐述了目前认知无线电组网过程的四个基本部分：节点交汇，拓扑建立，信道选择，路由选择。目前的论文研究主体依然在以信道交汇为主要内容，各种优秀的跳频序列算法也都得到了数学理论验证，而且根据跳频序列的交汇过程也是最适合分布式 CR 网络的交汇方法，本课题的研究内容也是基于跳频序列模式开展。同时综述中也提到了路由算法，对于多条的 ad-hoc 网络，按需路由协议依然可以得到应用，在 CR 网络中需要额外考虑信道维持概率，以跳数为主要权值进行路由选择，所以课题研究会以按需路由协议作为基础。</p> <p>2. 课题的最终目的是给出完备的协议设计以及理论分析，在此基础上完成协议的仿真，所以在参考 cognesh 与其他模型后，在 c++编程环境中尝试验证了接入层与 mac 层的帧简单模拟。根据认知自组网的要求与环境给出了主用户与认知用户的行为模型，对于开机之后的操作</p>				

		<p>进行了模拟，每个主用户都可以随机占用一个不重复的频率进行通信，认知用户可以感知到通信范围内的不同的主用户所占用的频段，并将其排除可用信道列表。使用的信道交汇策略是基于分组信道交汇方法，根据论文中对此方法的介绍进行了编程实现，拓扑发现策略是基于分簇的拓扑发现，编程中实现了在通信范文内的认知节点可以实现簇头的选举与通信频段的选择，同时不会对通信范围内的主用户形成干扰，体现为不占用主用户所使用的任何信道，并且制定了等待时间，等待时间内可以使得未加入的认知用户直接进入拓扑发现阶段。这两个过程中节点之间的通信均使用自定义的帧，路由选择方面初步提出了一种帧的定义，有待验证。</p> <p>详细代码: <a href="https://github.com/moonhwi/">https://github.com/moonhwi/</a></p>	
		是否符合任务书要求进度 是	
尚需完成的任务		1. 完成不同情境模式下网络性能（包括组网时间，组网成功率等）的仿真 2. 给出完整的路由发现的过程，并分析会对其产生影响的因素。	
存在问题和解决办法		存在问题	路由发现过程中怎么减小网络的消耗
		解决办法	设定一种按需路由协议与先验式路由协议，分别适应不同的应用场景。
指导教师签字		日期	年 月 日
检查小组意见	<div style="text-align: right;">负责人签字： 年 月 日</div>		

注：可根据长度加页。