软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2014,25(3):606−630 [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004522]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

认知无线电网络信道交汇研究综述*

刘 权[1], 赵光胜[2], 王晓东[1], 周兴铭[1]

[1](并行与分布式处理国家重点实验室(国防科学技术大学),湖南 长沙 410073)

[2](解放军外国语学院 语言工程系,河南 洛阳 471003)

通讯作者: 刘权, E-mail: liuquan@nudt.edu.cn

摘 要: 认知无线电技术被认为是解决目前频谱资源利用率低下问题最有前景的技术,基于该技术,认知无线电网络采用动态频谱接入方式有效地提高了授权频段的利用率.然而,动态变化的信道可用性极大地增加了认知无线电网络组网的难度.信道交汇旨在为用户通信提供公共传输媒介,是实现无线网络组网的基础.介绍了认知无线电网络信道交汇的基本概念和特点,并阐述了信道交汇策略设计面临的挑战以及应考虑的性能指标.提出了信道交汇策略的分类标准和系统模型,根据该分类标准,详细剖析了当前信道交汇策略相关的研究工作.最后,讨论了认知无线电网络信道交汇研究的开放性问题,以期为未来的研究指出可能的方向和重点.

关键词: 认知无线电;认知无线电网络;动态频谱接入;信道交汇;组网

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

中文引用格式: 刘权,赵光胜,王晓东,周兴铭.认知无线电网络信道交汇研究综述.软件学报,2014,25(3):606−630. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4522.htm

英文引用格式: Liu Q, Zhao GS, Wang XD, Zhou XM. Rendezvous in cognitive radio networks: A survey. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014,25(3):606−630 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4522.htm

Rendezvous in Cognitive Radio Networks: A Survey

LIU Quan[1], ZHAO Guang-Sheng[2], WANG Xiao-Dong[1], ZHOU Xing-Ming[1]

[1](Science and Technology on Parallel and Distributed Processing Laboratory (National University of Defense Technology), Changsha 410073, China)

[2](Department of Language Engineering, PLA University of Foreign Languages, Luoyang 471003, China)

Corresponding author: LIU Quan, E-mail: liuquan@nudt.edu.cn

Abstract: Cognitive radio technology is regarded as the most promising technique to solve the problem of ultra-low utilization efficiency of wireless spectrum resources. Based on this technology, cognitive radio networks (CRNs) effectively improve utilization efficiency of licensed spectrum through dynamic spectrum access. However, the resultant dynamic channel availability significantly increases the difficulty in networking for CRNs. Rendezvous aims at providing common media for communication between users, which is the foundation of networking in wireless networks. This paper introduces the basic concept and characteristics of rendezvous in CRNs and dissect the challenges and concerned performance metrics in design of rendezvous schemes. According to the proposed classification criteria and system models, the related research work on rendezvous schemes are analyzed in depth. Finally, open problems in rendezvous schemes design are discussed to point out future research trends and focuses.

Key words: cognitive radio; cognitive radio network; dynamic spectrum access; rendezvous; networking

随着无线网络技术和应用的迅猛发展,无线频谱资源已分配殆尽,使得新兴无线应用很难分配到专属的无

* 基金项目: 国家自然科学基金(61070203, 61202484)

收稿时间: 2012-11-14; 定稿时间: 2013-11-18; jos 在线出版时间: 2013-12-05

CNKI 网络优先出版: 2013-12-05 13:37, http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20131205.1337.002.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

线频谱资源.然而,通过大量频谱测量研究工作发现,导致频谱资源供需矛盾的根源并不是频谱资源稀缺,而是当前静态频谱管理策略.相比于日益拥挤的非授权频段,授权频段的低利用率成为研究者解决频谱资源供需紧张问题的突破口.认知无线电技术[1,2]一经提出,就被认为是解决静态频谱分配策略所导致的频谱利用率低下问题最有前景的技术.基于该技术的认知无线电网络[3,4]采用动态频谱接入方式[3−5],能有效提高授权频段的利用率,被认为是无线网络未来演化和发展的方向.由于主用户(primary user,简称 PU,亦称授权用户)对授权频段使用的优先级高于认知无线电网络中的次用户(secondary user,简称 SU,亦称非授权用户或认知用户),次用户在使用授权频段之前需要探测主用户信号,采用 Underlay 或 Overlay 频谱共享机制[3,4]实现和主用户共存,以避免对主用户的通信产生有害干扰.

认知无线电网络本质上是一种多信道无线网络,组网 MAC 协议设计同样需要解决两类问题[6]:(1) 接入协商,即发送者能找到接收者并使用相同信道进行通信;(2) 多用户冲突避免和冲突解决.信道交汇(rendezvous)针对解决接入协商问题(或公共控制信道问题),为次用户提供公共传输媒介以建立通信链路.它是完成控制和数据信息传输最基础且不可缺少的过程,是实现网络管理和控制(如邻居发现、收发双方握手、拓扑控制以及路由请求广播和路由信息更新等)的前提条件.特别是在认知无线电网络中,独有的协作频谱感知[7]需要有公共信道支持次用户之间共享感知结果,以提高主用户的探测精度.然而,在认知无线电网络中实现信道交汇面临非常严峻的挑战.因为次用户对信道的使用需要顺从于主用户活动,信道可用性在时域上不仅是动态变化的,而且每个次用户的可用信道集合在频域和空域上呈现出异构特性[8].因此,信道交汇研究对于实现认知无线电网络组网和实际部署意义重大.

本文第 1 节介绍信道交汇的基本概念.第 2 节提出新的信道交汇策略分类标准.第 3 节指出在认知无线电网络中设计信道交汇策略面临的挑战.第 4 节详细介绍现有的信道交汇策略并深入剖析解决挑战的主要方法.第 5 节提出认知无线电网络信道交汇策略设计的相关开放性问题.最后对全文进行总结.

1 介 绍

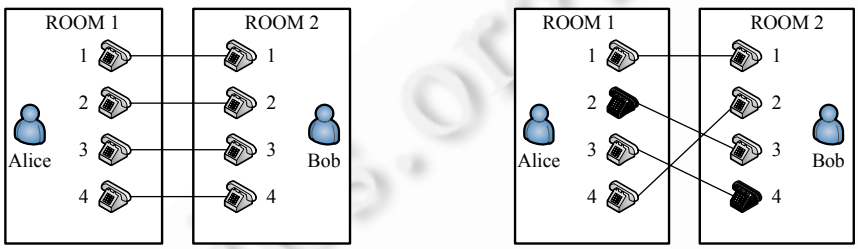
定义 1(信道交汇). 两个或多个无线设备在相同信道上相遇并建立通信链路的过程称为信道交汇,该相同信道称为交汇信道.

信道交汇属于交汇搜索(rendezvous search)问题范畴.交汇搜索问题的研究涉及领域非常广泛,除了多信道无线网络之外,还有图论[9]、机器人[10]和控制决策[11]等领域,并由此催生出了交汇搜索这一新理论[12].我们用 Alpern 在文献[12]中提到的电话协调博弈(如图 1 所示)同信道交汇作类比阐述,以便了解认知无线电网络信道交汇的新特点.Alice 和 Bob 各自在不同的房间内试图通过电话联系对方,但是他们不知道对方在什么时候会拿起哪台电话.为了描述简单,假设 Alice 和 Bob 能同时拿起或挂断某个电话.当 Alice 和 Bob 拿起 1 号电话时,他们成功取得联系,即实现交汇.对应到无线网络,Alice 和 Bob 是网络的两个用户,房间的 4 台电话表示网络的 4 个信道,电话的编号表示网络的逻辑信道,电话之间的连线表示网络的实际物理信道.虽然认知无线电网络是一种多信道无线网络,但是其信道交汇策略设计要比传统多信道无线网络复杂.对于传统多信道无线网络(如图 1(a)所示),Alice 和 Bob 所有电话都是相连的并且有连接的两台电话标签相同,即相同的逻辑信道对应于同一物理信道.对于认知无线电网络(如图 1(b)所示),Alice 和 Bob 的所有电话不一定都相连(因用户的工作频段范围不同),并且有连接的两台电话标签可能不同,使得他们拿起相同标签的电话也无法成功建立联系.此外,由于主用户活动会导致电话出现故障(图 1(b)中的黑色电话所示),Alice 和 Bob 即使能拿起有连接的两台电话(Alice 拿起 2 号电话,Bob 拿起 3 号电话)也无法成功建立联系.

传统多信道无线网络 MAC 协议解决信道交汇问题主要有两类思想[13]:(1) 网络预设专用公共控制信道(dedicated common control channel,简称 DCCC);(2) 网络无专用公共控制信道.网络预设专用公共控制信道的思想是:在网络中预设全局信道交汇点(如图 2(a)中专用公共控制信道策略和图 2(b)中分时段策略所示),专用于所有用户交互控制信息以完成数据信道协商,是一种静态实现信道交汇的思想.网络无专用公共控制信道的思想是通过信道跳转实现用户信道交汇(如图 2(c)中共同信道跳转策略和图 2(d)中多交汇策略所示),使得网络中

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

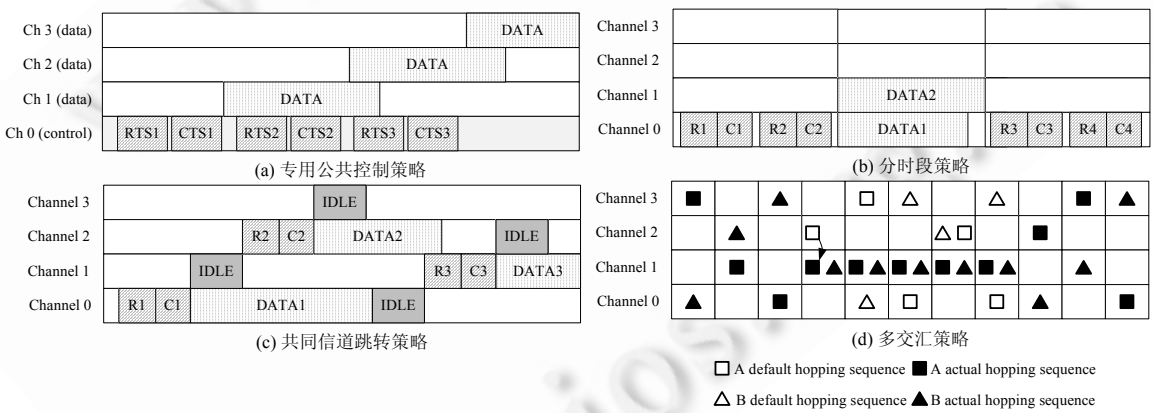
所有信道都能成为交汇信道,是一种动态实现信道交汇的思想.因专用公共控制信道策略,分时段策略和共同信道跳转策略让所有用户在同一信道上竞争资源,它们又称为单交汇(single rendezvous)策略.多交汇(multiple rendezvous)策略能够将所有用户分布在多个信道上并行竞争资源,相比单交汇策略更能获得多信道增益,提升网络容量.然而,这些信道交汇策略在认知无线电网络面临诸多新挑战:基于网络预设专用控制信道思想面临全局信道交汇点的存在性与可用性问题,而基于网络无专用控制信道思想面临因主用户活动所导致信道交汇效率低下的问题.虽然认知无线电网络信道交汇策略的研究继承了传统多信道无线网络信道交汇策略设计的思想,但随着研究的发展,传统多信道无线网络信道交汇策略的分类标准[14,15](如图 2 所示)已无法准确刻画和合理划分现有针对认知无线电网络特点所设计的信道交汇策略.



(a) 传统多信道无线网络 (b) 认知无线电网络

Fig.1 Telephone coordination game

图 1 电话协调博弈示意图



(a) 专用公共控制策略 (b) 分时段策略

(c) 共同信道跳转策略 (d) 多交汇策略

Fig.2 Rendezvous approaches in MAC protocols of traditional multi-channel wireless networks[13]

图 2 传统多信道无线网络的信道交汇策略[13]

2 策略分类标准及实现系统模型

2.1 分类标准

我们结合文献[16,17]中信道交汇策略分类思想的优点,将信道交汇策略分为有辅助的信道交汇策略和盲信道交汇策略两大类(如图 3 所示).该分类基于信道交汇策略实现的系统依赖条件,即是否依赖网络预设专用公共控制信道.从系统依赖条件出发对信道交汇策略进行分类的好处是可以凸显信道交汇策略设计中的循环依赖问题(又称“鸡-蛋”问题),即交汇信道的建立依赖次用户通过已有的交汇信道实现交互协商.该问题常被研究者所忽视,主要出现在盲信道交汇策略设计中,在基于分簇/分组策略中表现尤为明显.

有辅助的信道交汇策略依赖网络预设专用公共控制信道,因而又称为基于专用公共控制信道的信道交汇

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

策略.该策略直接继承了传统多信道无线网络 MAC 协议设计的思想,是一种静态主动的信道交汇策略.由于预设的专用公共控制信道是网络次用户已知的信道交汇点,因而有辅助的信道交汇策略极大简化了次用户之间完成信道交汇和协商通信链路建立的过程.目前,认知无线电网络大量 MAC 协议(见文献[18,19]及其参考文献)设计都采用这种静态策略.然而,覆盖全网的专用公共控制信道极易因网络负载的增加成为限制网络容量提高的瓶颈.更为严重的是,专用公共控制信道会因主用户占用和拒绝服务攻击给网络带来单点失效的风险.

盲信道交汇策略[20,21]不依赖网络预设的专用公共控制信道,是一种动态按需的信道交汇策略,也是最适合认知无线电网络信道可用性动态变化特性的策略.该类策略细分为基于信号处理的信道交汇策略、基于面向接收者的信道交汇策略、基于信道跳转序列的信道交汇策略和基于分组/分簇的信道交汇策略.基于信号处理的信道交汇策略采用新的物理层传输技术,如超宽带(ultra-wide bandwidth,简称 UWB)和非连续正交频分复用(non-continuous orthogonal frequency division multiplexing,简称 NC-OFDM),建立不受主用户活动影响的专用公共控制信道,以及使用导频音(pilot tone)和信号模式识别技术支持次用户之间相互搜寻;基于面向接收者的信道交汇策略让次用户选择自己的静默信道(quiescent channel)作为数据接收信道,当次用户处于接收状态时,静默信道将是自己和发送用户的交汇信道;基于信道跳转序列的信道交汇策略将次用户通过频谱感知获取的所有可用信道组织成有特定序列结构的信道跳转序列,并以时槽(time-slotted)的工作方式按照序列执行信道跳转过程,直至次用户之间完成信道交汇,信道跳转序列的设计有依赖时钟同步的同步序列和不依赖时钟同步的异步序列;基于分簇/分组的信道交汇策略的目的是构造特定网络结构(如组结构或者簇结构)和扩大交汇信道覆盖范围,但这需要事先完成次用户之间频谱信息(例如可用信道集合、信道质量和可用性等等)的交互,如果这些信息的相互传输需要依赖交汇信道,将出现循环依赖问题.

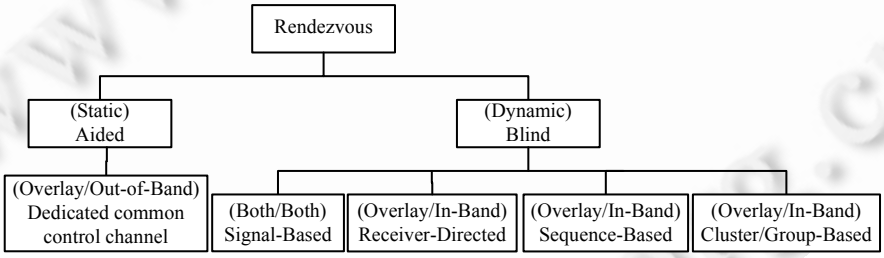


Fig.3 Taxonomy of rendezvous in CRNs

图 3 认知无线电网络信道交汇策略分类标准

2.2 系统模型

设计认知无线电网络信道交汇策略需要考虑 3 类影响因素:网络支持能力、设备能力和网络环境影响.通常,这 3 类因素是设计认知无线电网络信道交汇策略的假设前提条件.网络支持能力是网络自身属性特征对信道交汇策略设计所能提供的帮助,在一定程度上决定了信道交汇策略实现的基本思想及构架;设备能力反映了次用户在信道交汇过程中的搜寻能力大小,决定了信道交汇策略的性能及实现难度;网络环境条件是网络中除次用户活动之外的其他用户活动情况,如主用户的信道占用活动以及恶意用户的攻击活动,决定了信道交汇策略对环境影响的鲁棒性.具体内容如下:

(1) 网络支持能力(network capability)

- 时钟同步:网络具备时钟同步能力,能够支持次用户收发操作和信道切换的调度,提高信道交汇性能;
- 异构角色:次用户在信道交汇过程中所扮演的角色不同(如 master/slave,mommy/baby 或 sender/receiver 等等),其执行的操作也不同(如 beacon/listen 或 signaling/scan 等等);
- 交汇用户数:使用同一交汇信道的用户数,反映了信道交汇策略所建交汇信道的覆盖范围.交汇信道的覆盖范围越广,越有利于提高网络广播操作效率,降低信道切换开销,但也容易导致网络拥塞问题;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

- 相同信道标签:网络中,相同物理信道使用相同编号(即逻辑信道 1,2,…).在传统多信道无线网络中,每个用户的相同信道标签对应相同物理信道,然而在认知无线电网络中,次用户对频谱使用的灵活性以及工作频段范围的差异性,导致不同次用户的相同信道标签可能对应不同物理信道;
- 中心控制器:网络中心控制器通过实现对频谱分配的集中式管理,可以极大降低信道交汇的难度;
- 预设控制信道:为次用户提供全网信道交汇点,辅助次用户快速建立通信链路.

(2) 次用户设备能力(SU capability)

- 宽频操作:次用户能够同时在多个信道上搜寻目标用户,提高了次用户信道交汇的概率,降低了信道交汇的难度.然而,硬件复杂性和开销以及频谱使用政策制约了次用户使用宽频操作的能力;
- 信道交汇公平性:信道交汇策略能够将次用户的所有可用信道考虑到信道交汇过程中,并使每个可用信道都有同等机会成为潜在的交汇信道;
- 信号检测精度:次用户通过频谱感知检测主用户信号是否出现.频谱感知的检测精度,如漏检率(false negative)和误检率(false positive),将影响次用户的可用信道集合和信道交汇性能.

(3) 网络环境影响(network environment)

- 公共频段范围:主用户对频谱资源的占用在时空上呈现动态变化特性,因而,同一时间内不同次用户所检测到的可用频段范围不完全相同,增加了信道交汇策略设计的复杂性;
- 网络恶意行为:规避网络恶意用户对信道交汇过程的攻击,提高信道交汇策略对网络恶意攻击的鲁棒性.对于网络中常见的 jamming 攻击,尤其是攻击效率高的被动 jamming 攻击,信道交汇策略需要让次用户具备在 jamming 攻击出现时快速建立新的交汇信道以及摆脱被动 jamming 攻击者尾随攻击的能力.

根据信道交汇策略的实现对假设前提条件依赖程度由高到低排列(如表 1 所示,√表示依赖),信道交汇策略有 5 种不同的实现系统模型(见表 1):有辅助系统模型(assisted)、角色系统模型(roles)、共享系统模型(shared)、个体系统模型(individual)和无依赖系统模型(free-for-all)[17].它们从信道交汇策略实现所依赖假设条件的角度反映不同策略设计的特点以及复杂程度.由于这 5 种系统模型并不能完美区分所有信道交汇策略,本文将根据“最符合”的原则将现有信道交汇策略研究工作归类到不同系统模型中.有辅助的系统模型不仅应用于集中式网络场景,同时也应用于分布式网络场景[22−26].角色系统模型最早应用于蓝牙通信系统[27],此外,一部分多信道无线网络 MAC 协议[28−30]也根据“transmitter/receiver”角色区分设计信道交汇策略,形成了一类基于面向接收者的信道交汇策略.共享系统模型和个体模型的差别在于:共享系统模型不考虑每个次用户的差异性,所有次用户不仅可用信道相同,而且信道标签设置也相同,因而这种系统模型也被称为对称模型(symmetric model);个体系统模型凸显次用户之间的差异性,符合次用户可用信道异构特点,因而该系统模型也被称为非对称模型(asymmetric model).无依赖系统模型对假设条件依赖程度最小,但设计满足特定性能的信道交汇策略难度最大.

Table 1 System models of rendezvous schemes

表 1 信道交汇策略的实现系统模型

Assumptions \ System model		Assisted	Roles	Shared	Individual	Free-for-All
Network capability	Synchronization	√	√			
	Heterogeneous roles	√	√			
	Rendezvous radios	*n*	2	2	2	*n*
	Common channel labels	√	√	√		
	Central controller	√				
	Preset control channel	√				
SU capability	Rendezvous fairness	√	√	√	√	
	Wideband operation	√				
	No detection errors	√	√	√	√	
Network environment	Common spectrum	√	√	√		
	No malicious radios	√	√	√	√	

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.3 小 结

综上所述,本文将现有的认知无线电网络信道交汇策略研究工作从 8 个方面进行分类(见表 2,“–”表示无法知道):网络场景(Scen.),集中式或分布式;分类标准(category);系统模型(Sys.);天线数(radio);是否依赖时钟同步(Syn.);是否多交汇策略(M-RDV);是否保证信道交汇时间有界(Boun.);交汇信道覆盖范围(Cov.),链路覆盖、局部覆盖或全局覆盖.

Table 2 Rendezvous design schemes in CRNs

表 2 认知无线电网络信道交汇设计策略分类表

Schemes	Scen.	Category	Sys.	Radio	Syn.	M-RDV	Boun.	Cov.
DSAP[61]	Centralized	DCCC	Assisted	Two	NO	NO	YES	Global
DSA-Driven MAC[62]	Centralized	DCCC	Assisted	Single	NO	NO	YES	Global
CREAM-MAC[22]	Distributed	DCCC	Assisted	Two	NO	NO	YES	Global
Opportunistic MAC[23]	Distributed	DCCC	Assisted	Two	NO	NO	YES	Global
OS-MAC[24]	Distributed	DCCC	Assisted	Single	NO	NO	YES	Global
HC-MAC[25]	Distributed	DCCC	Assisted	Single	NO	NO	YES	Global
OSA-MAC[26]	Distributed	DCCC	Assisted	Single	NO	NO	YES	Global
OFDM-CCC[67]	Distributed	Signal	Role	Single	NO	NO	YES	Global
UWB-CCC[64,66]	Distributed	Signal	Shared	Two	NO	NO	YES	Local
Pilot tone[68,69]	Distributed	Signal	Role	Single	NO	YES	YES	Link
Cyclic stationary[72,73]	Distributed	Signal	Role	Single	NO	YES	–	Link
RDT MAC[29]	Distributed	Rcv.-Direc.	Role	Multi.	NO	YES	–	Link
xRDT MAC[30]	Distributed	Rcv.-Direc.	Role	Two	NO	YES	–	Link
C. Xin[75–78]	Distributed	Rcv.-Direc.	Role	Single	YES	YES	–	Link
OSA-HCC[82]	Distributed	Sequence	Shared	Single	YES	NO	YES	Global
SYN-ETCH[83]	Distributed	Sequence	Shared	Two	YES	YES	YES	Link
L-QCH, M-QCH[39]	Distributed	Sequence	Shared	Single	YES	YES	YES	Link
Pure Random[17]	Distributed	Sequence	Free-for-All	Single	NO	YES	NO	Link
AMRCC[121,122]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	NO	Link
A-MOCH[39]	Distributed	Sequence	Role	Single	NO	YES	YES	Link
Romaszko[86–88]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	YES	Link
GOS[90]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	YES	Link
ASYN-ETCH[83]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	YES	Link
BIBD[40]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	YES	Link
DRSEQ[94]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	YES	Link
JS-2-SM[18]	Distributed	Sequence	Shared	Single	NO	YES	YES	Link
JS-2-AM[18]	Distributed	Sequence	Individual	Single	NO	YES	YES	Link
MC, MMC[17]	Distributed	Sequence	Individual	Single	NO	YES	YES	Link
CRSEQ[95]	Distributed	Sequence	Individual	Single	NO	YES	YES	Link
CogMesh[104]	Distributed	Cluster	Role	Single	NO	YES	–	Local
DCP-CCC[106]	Distributed	Cluster	Role	Single	NO	YES	–	Local
SOC[107]	Distributed	Cluster	Role	Single	NO	YES	–	Local
HD-MAC[103]	Distributed	Group	Shared	Single	NO	YES	–	Local
Swarm Intelligence[108]	Distributed	Group	Shared	Single	NO	YES	–	Local
ERCC[43]	Distributed	Group	Shared	Two	NO	YES	–	Local

3 研究挑战及性能指标

设计认知无线电网络信道交汇策略面临 3 个主要方面的挑战:交汇收敛、交汇自愈和交汇安全.由于盲信道交汇策略是目前的研究趋势,我们针对盲信道交汇策略提出相应性能指标以应对这些挑战.

3.1 交汇收敛

定义 2(交汇收敛,rendezvous convergence). 大量邻居用户使用同一信道作为交汇信道.

当网络负载增加,交汇收敛将极易导致交汇信道上的通信量达到饱和,加剧次用户通信冲突,并且交汇收敛阻碍获取多信道增益.交汇收敛带来的信道拥塞问题取决于多种因素,如交汇信道的带宽、交汇信道上的通信量、使用相同交汇信道区域内的用户密度以及用户的传输功率.然而,交汇收敛会扩大交汇信道的覆盖范围,有利于提高网络广播报文转发效率,降低网络广播控制开销以及数据流路径上转发者的信道切换开销.因此,设计信道交汇策略需要权衡交汇收敛和交汇信道覆盖范围之间的关系.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

有辅助的信道交汇策略所预设的专用控制信道覆盖范围最广,同时也极易出现交会收敛问题.为了避免控制信道因饱和而成为网络容量提升的瓶颈,主要解决方法有文献[31]中提出的降低控制报文传输总量、提高控制信道带宽和优选控制信道迁移等 3 种.降低控制报文传输总量与具体应用相关,需要考虑性能折衷问题,如协作频谱感知[7]使用汇报信道收集协作节点的频谱感知结果,需要考虑如何平衡原始感知结果、经审查后的感知结果和本地决策后的感知结果这 3 种不同传输总量和协作频谱感知准确性之间的关系.通常情况下,控制信道带宽和数据信道带宽是一样的,为了提高控制信道带宽,可以使用动态信道化策略.SRAC-MAC[32]采用 IEEE 802.22[33]提出的信道聚合思想,以定义的原子信道带宽(b Hz)为单位,根据控制信道带宽需求将 k(k=1,3,5,…)个连续原子信道聚合成为带宽为 kb Hz 的控制信道.优选控制信道迁移在当前控制信道质量无法满足控制报文总量传输时,将网络控制信道迁移到信道质量更好的新控制信道上.然而,次用户可用信道的异构特性使得覆盖全网的专用控制信道存在概率极低,需要为网络特地分配或设计一个不受主用户活动影响的专用控制信道[22−26].

盲信道交汇策略动态建立的交汇信道,其覆盖范围是非全网的,可以有效避免次用户出现行为趋同现象[34].为防止交汇信道拥塞,在策略设计上需要保证网络的所有信道都有相同的机会成为交汇信道,保证信道被接入使用的公平性.通过将交汇信道分散到网络所有信道上,可以充分获取认知无线电网络的多信道增益.然而在盲信道交汇策略下,次用户实现信道交汇的时间开销大,很难实现高效广播操作,这使得基于盲信道交汇策略的广播机制设计成为目前认知无线电网络的研究热点[35−38].为了避免交汇收敛并提高信道交汇效率,盲信道交汇策略需要考虑如下性能指标:

- 交汇信道负载:在盲信道交汇策略中,网络中每个信道都有一定概率被次用户选作交汇信道,其中,被选作交汇信道的最高概率即为交汇信道负载[39].交汇信道负载越高,说明网络中极易出现交汇收敛;
- 交汇系统负载:交汇系统负载为所有交汇信道负载的最小值[39];
- 交汇公平性:交汇公平性反映了信道被接入使用的公平性[40].交汇信道负载越小,说明交汇公平性越好,越利于均衡网络负载.交汇公平性可使用文献[41]中提出的公平性衡量指标进行量化计算;
- 最大交汇时间(maximum time to rendezvous,简称 MTTR):在不考虑主用户活动时,通信双方在最坏情况下(交汇信道第 1 次出现的最迟情况)实现信道交汇所消耗的时间.MTTR 是否存在,决定了盲信道交汇策略是否为确定性策略(另一种为概率性策略);
- 平均交汇时间(expected time to rendezvous,简称 ETTR):ETTR 是通信双方实现信道交汇时间开销的平均值,用于分析在不考虑主用户活动影响的情况下建立交汇信道的快慢程度;
- 交汇时间抖动(jitter time to rendezvous,简称 JTTR):JTTR 是通信双方实现信道交汇时间开销的方差,我们在文献[42]中提出 JTTR 以保证实时数据业务(如 VoIP 和视频)传输的服务质量.

3.2 交汇自愈

在主用户活动导致交汇信道失效后,如何快速建立新的交汇信道,即交汇自愈(rendezvous resilience),是信道交汇策略需要重点考虑的问题.备用信道和交汇信道多样性是实现交汇自愈的两种主要途径.

对于有辅助信道交汇策略,当专用公共控制信道被主用户占用后,次用户将无法协商建立新的公共控制信道以恢复网络的连通性,因而其主要采用备用信道方法.在 IEEE 802.22 标准[33]中,当 CPEs(consumer premise equipments)失去和基站关联时,从自己的备用信道列表中选择一个信道重新关联到基站,如果关联失败,则再从备用信道列表中选择一个新的信道,直到和基站建立关联.当备用信道列表中的所有信道都无法和基站建立关联时,CPEs 回到初始化状态,重启和基站的关联过程.

盲信道交汇策略使用备用信道和交汇信道多样性实现交汇自愈.ERCC[43]中,每个次用户探测本地各个信道上主用户活动情况,按主用户干扰程度从低到高建立信道排序表(即备用信道列表),并通过广播 beacon 报文交互信道排序表实现邻居范围内次用户信道排序表的一致性.在开始通信时,每个次用户选择自己信道排序表的第 1 个信道完成信道交汇,当主用户出现在该信道上时,各个次用户选择信道排序表中的第 2 个信道作为交汇信道,达到高效恢复交汇信道的目的.基于信道跳转序列的信道交汇策略采用最大化交汇信道多样性提高对主用户活动鲁棒性.当通信双方的信道跳转序列能够保证网络所有信道在一个序列周期内都能成为交汇信道

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

时,交汇信道多样化达到最大,称为完全交汇(complete rendezvou)[44];反之,则为部分交汇(partial rendezvous).完全交汇可以高效重建交汇信道.采用交汇信道多样性应对交汇自愈挑战时,需要考虑如下性能指标:

- 最大条件交汇时间(maximum conditional time to rendezvous,简称 MCTTR):在考虑主用户活动时,通信双方在最坏情况下完成信道交汇的消耗时间.MCTTR 存在的前提条件是实现完全交汇;
- 交汇重叠度:在某有限时间内,通信双方交汇信道出现的最小次数.交汇重叠度越高,说明交汇多样性越大[45,46],重建交汇信道的效率越高;
- 系统交汇概率:通信双方交汇信道出现的时间在某参考总时间内所占比率.系统交汇概率也可表示通信双方交汇信道出现的频率,频率越高,说明信道交汇策略抵御主用户活动影响的能力越强.

3.3 交汇安全

信道交汇策略的设计需要考虑抵御外界恶意用户攻击,保证交汇安全(rendezvous security).传统加密和认证等安全策略[47]可以有效遏制交汇信道上偷听窃取等的攻击效果,然而对于交汇信道的 jamming 拒绝服务攻击,目前还需进一步研究有效防御策略.被动 jamming 攻击[48]是一种智能攻击方式,攻击者在具备认知无线电技术能力后,通过学习实现对认知无线电网络特定网络操作和功能(如频谱感知、信道切换和控制报文等)[49,50]发起有选择性的实时攻击,达到最大化攻击效果和最小化攻击开销的目的.扩频通信(直接序列扩频 DSSS 和跳频扩频 FHSS)是防御一般 jamming 攻击的有效手段.由于 DSSS 通信信道中心频率固定,即使在扩频码未泄漏的情况下, jamming 攻击者通过提高攻击信号能量依然可以达到有效攻击效果.因而,解决信道交汇安全问题的主要策略是跳频扩频:控制信道跳频[51,52]和无协调跳频(uncoordinated frequency hopping,简称 UFH)[53−56].

有辅助信道交汇策略的专用公共控制信道是整个网络的安全脆弱点,极易成为 jamming 攻击者提高攻击效果的有利目标.盲信道交汇策略动态建立交汇信道,本质上就是一种控制信道跳频方式,因而安全性要高于前者.文献[51]中提出的控制信道跳频策略,通过将网络控制信道隐藏在随机跳频序列中,达到规避 jamming 攻击的目的.簇头将随机种子和所选控制信道通过安全通道分配给簇内的每个次用户,由于每个跳频序列中控制信道插入点的选择是相同的,簇内所有次用户在某个时槽内能够使用相同的信道作为控制信道.文献[52]提出的随机控制信道密钥分配方法,通过控制信道定位函数将控制信道标签映射到时频二维空间中.在每个时槽内,基站从控制信道标签集合中随机选择多个子集合,通过密钥安全分发框架发送给每个次用户以实现信道交汇.然而,文献[51,52]中提出的控制信道跳频策略需要依赖假定的扩频码安全分发机制支持通信双方交互控制信道跳频扩频码.如果扩频码安全分发机制采用扩频通信方式实现,将会出现循环依赖问题(如图 4 所示)[53].如何保证扩频码的安全传输以及克服循环依赖问题,是交汇安全面临的主要挑战.

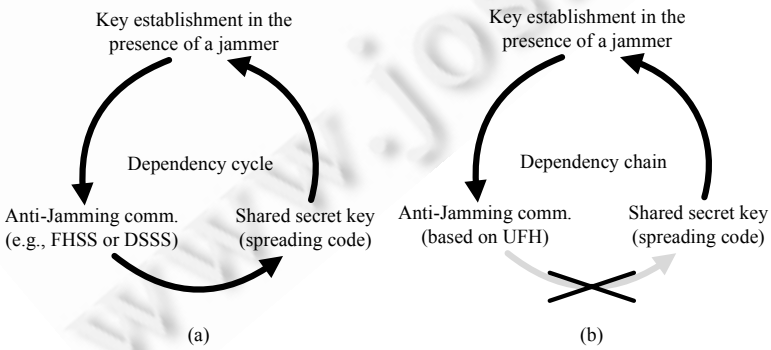


Fig.4 Anti-Jamming/Key-Establishment circular dependency graph[53]

图 4 防御 jamming 攻击和扩频码协商的循环依赖[53]

UFH 策略无需任何扩频码交互,次用户依靠本地决策跳频方式实现信道交汇,属于盲信道交汇中基于信道跳转序列的策略.文献[53]中,发送者和接收者采用随机跳频方式抵御 jamming 攻击.为了让发送者和接收者在某个时间内切换到同一信道内完成数据报文的传输,发送者采用较高的信道切换频率,并且在每个信道上的驻

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

留时间小于接收者的信道驻留时间.发送者采用较高信道切换频率通常会将一个报文切分成多个短数据帧发送,接收者利用多 hash 链表结构除了能够抵御攻击者的注入攻击,还能降低整合短数据帧的时间和空间复杂度.由于通过随机跳频完成信道交汇的时间效率低下,文献[54]提出了基于 Quorum 系统的跳频方式,利用 Quorum 系统的相交特性,保证通信双方能够在一定时间内完成信道交汇以提高信道交汇的时间效率.文献[55]中假设收发双方使用多根天线达到同时访问多个信道的目的.收发双发首先各自随机选择多个信道,每个信道对应一根天线,并根据信道上主用户信号和 jamming 攻击的出现更新信道收益值.通过 MAB(multiple-armed bandit)算法保证收发双方在信道收益值动态变化过程中所选择的信道集合基本相同,且其中每个信道在当前时刻可用概率高,以实现性能有保障的信道交汇.文献[56]考虑了收发双方各只有一根天线的情况,通过分析 jamming 攻击者和次用户之间攻防交互情况,将问题建模成抵御 jamming 攻击的博弈论模型,并基于马尔科夫决策过程指导收发双方设计信道跳转序列实现信道交汇.UFH 策略适用于完全分布式网络场景,并且可以有效遏制 jamming 攻击的效果.但是 UFH 策略实现信道交汇的时间效率低,限制了系统通信容量的提高.盲信道交汇策略采用信道跳转序列应对交汇安全挑战时,需要考虑如下性能指标:

- 规避熵(evasion entropy,简称 EE):规避熵表示 jamming 攻击者通过利用交汇信道变更的历史信息推断未来交汇信道的能力[51].X_i 表示交汇信道在时槽 i 中所在频段位置的随机变量,$H(X|Y)$表示在给定历史信息 Y 的前提下随机变量 X 的条件熵.在时槽 i 中的规避熵可表示为

$$EE_i = H(X_i \mid X_{i-1}, X_{i-2}, ..., X_0),\ H(X \mid Y) \triangleq \sum_x \sum_y \Pr[x]\Pr[x \mid y]\log_2 \Pr[x \mid y].$$

  其中,$\Pr[x]$和 $\Pr[x|y]$分别是 $\Pr[X=x]$和 $\Pr[X=x|Y=y]$的缩写.$EE_i=0$,说明 jamming 攻击者能够准确推断交汇信道未来所在频段;$EE_i=H(X_i)$,说明交汇信道未来所在频段无法通过历史信息推断得到.
- 规避延迟:通信双方从交汇信道遭受 jamming 攻击时开始,直到重建新交汇信道的时间开销;
- 规避率:通信双方交汇信道在有 jamming 攻击的情况下,其可用时间占参考时间的比率,间接反映了 jamming 攻击者的攻击成功率.

4 信道交汇策略

本节将重点介绍盲信道交汇策略,并深入剖析相关研究工作的基本原理以及面临的具体挑战.

4.1 专用公共控制信道策略

专用公共控制信道策略是认知无线电网络研究初期解决信道交汇问题最常用的策略,该策略的主要优势是实现简单,不仅能用于有基础设施的集中式认知无线电网络,还能用于无基础设施的分布式认知无线电网络.通过在网络中预设一个所有用户共有的且时刻可用(always available)的控制信道,可以弱化认知无线电网络可用信道动态变化给组网协议实现带来的复杂度.为了保证次用户在数据收发的过程中不会因遗漏周围环境中的控制信息而出现多信道隐终端和聋问题[57],通常,网络设备会配置多根天线:控制天线工作在控制信道专门负责控制信息收发,数据天线工作在数据信道专门负责数据信息收发.

集中式认知无线电网络中,基础设施可以实现对网络频谱资源的统一管理和分配,使得专用公共控制信道策略成为最直观的信道交汇策略.网络中心控制器扮演网络频谱仲裁者(spectrum arbitrator)的角色,为网络中的用户分配可用频谱资源.它们通过频谱代理人或本地频谱数据库,租赁一段可用频谱作为全网的专用公共控制信道,用于次用户和中心控制器之间进行频谱信息交互,使次用户能够快速获得可用频段信息并建立通信链路.CORVUS[58],DIMSUMNet[59]和 KNOWS[60]等集中式认知无线电网络通过预设专用公共控制信道构建网络通信体系结构.DSAP 协议[61]中,DSAP 服务器将控制天线设定在预设的专用控制信道上与网络用户交互协调,以最优化网络性能为目的向次用户租赁网络频谱资源.DSA-Driven MAC[62]通过预设专用控制信道支持网络基站和次用户之间完成博弈协商,达到全网最优频谱接入的目的.

分布式认知无线电网络缺乏网络基础设施,采用分布式协调优化网络性能需要网络次用户获得更大范围的频谱信息以做出最优本地决策.通过预设网络专用公共控制信道为分布式协调提供信道交汇点,不仅可以降

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

低分布式协调实现的难度,而且全网可用的专用控制信道也利于网络次用户掌握更大网络范围内的频谱信息.为了保证所设置的专用公共控制信道不受主用户活动影响,研究者通常将专用控制信道预先设置在开放接入频段(如 2.4GHz 或 5GHz 的 ISM 频段)[22]或者为专用公共控制信道申请使用授权频谱资源[23−26].然而,在开放接入频段中建立专用控制信道,面临和该频段上其他众多无线业务激烈竞争资源的问题;而为专用公共控制信道分配授权频谱资源,背离了认知无线电技术提高频谱利用率的初衷.

4.2 基于信号处理策略

基于信号处理的信道交汇策略相比其他盲信道交汇策略的优势是支持实现 underlay 频谱共享机制.在 underlay 频谱共享机制下,利用 UWB 传输技术为网络次用户建立静态交汇信道.在 overlay 频谱共享机制下,不仅能利用 NC- OFDM 传输技术为网络次用户建立静态交汇信道,还能通过信号指纹构建动态交汇信道.

4.2.1 UWB 和 NC-OFDM

UWB 和 NC-OFDM 因自身抗干扰能力强和频谱利用率高的特点,成为认知无线电网络所青睐的物理层传输技术.虽然采用这些新的物理层传输技术所建立的交汇信道也是网络专用公共控制信道,但不同于专用公共控制信道策略的是,该专用公共控制信道的建立不以牺牲频谱使用效率为代价.

UWB 是一种扩频传输技术,使用纳秒或微秒级的非正弦波脉冲传输数据,将发送功率分散在非常宽的频谱范围.对于在同一频谱范围内的其他窄带传输来说,UWB 的发送功率将被视为是背景噪声功率.利用 UWB 传输技术的这个特点,能将网络专用公共控制信道隐藏于主用户传输频段上,使得主用户和次用户的传输可以同时在同一频段上进行而不会相互干扰,实现主用户和次用户之间 underlay 频谱共享策略.文献[63]建议使用 UWB 技术为协作频谱感知建立次用户用于共享感知结果的公共控制信道.由于 UWB 传输技术的发送功率受到严格限制,这种宽频谱传输的范围非常有限(传输距离大概 100m[64]),如何扩大 UWB 的传输范围,是一个亟待解决的问题.对于这一问题,有两种解决方法:(1) 降低 UWB 专用公共控制信道上的控制报文传输速率;(2) 使用多跳转发.对于某些控制报文传输量小的应用,降低控制报文的传输速率可以达到提高 UWB 传输范围的目的.文献[65]提出:在使用 UWB 技术的控制信道上使用 OOK 调制方式传输协作频谱感知结果,通过重复发送同一脉冲不仅能够降低误比特率,还能提高控制报文的传输范围.为了弥补 UWB 技术和其他传输技术传输范围的差异,文献[64,66]中提出,通过多跳转发弥补控制报文传输范围(采用 UWB 技术)和数据报文传输范围(采用其他传输技术)的差距.

NC-OFDM 是多载波传输技术,利用多个相互正交的子载波传输信息.通过关闭主用户活跃频段上的子载波,NC-OFDM 技术可以很灵活地避免对主用户传输产生有害干扰,实现主用户和次用户之间 overlay 频谱共享策略.文献[67]使用 NC-OFDM 技术在主用户传输信道之间的保护频段上建立专用公共控制信道,以避免对主用户干扰和受主用户活动影响(如图 5 所示).由于信道功率泄漏,主用户的传输会对保护频段上的专用公共控制信道产生干扰.为最小化相邻信道上主用户的干扰影响,文献[67]提出的优化框架能计算出保护频段上的最优子载波数、最优 OFDM 符号时间和在保护频段频宽限制下的最优 OFDM 子载波传输功率等参数.

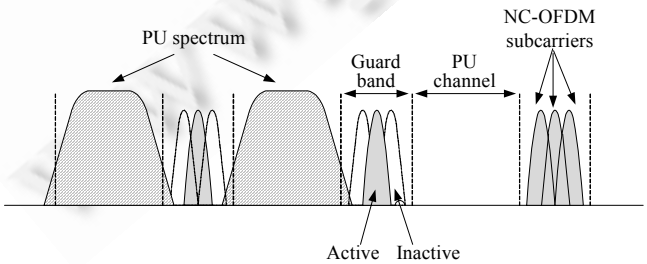


Fig.5 NC-OFDM based common control channel using guard band in licensed spectrum[67]

图 5 在授权频谱中基于非连续 OFDM(NC-OFDM)使用保护频段建立公共控制信道[67]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.2.2 信号指纹

信号指纹作为次用户身份标识符嵌入次用户所发射的信号中,当发送用户或接收用户扫描信道获得特定信号指纹时,便可以进一步识别出当前发送用户或接收用户是否为感兴趣用户,完成通信链路建立和数据传输.

文献[68,69]提出使用导频音标识接收用户所在信道.处于空闲状态下的次用户在各自不同的中心载频上发射未调制的导频音,以标识它们所处的频率位置.当某个次用户有数据要传输时,通过扫描频谱获取工作频谱范围内的所有导频音信息,并通过收发双发握手过程询问每个导频音频率点处的接收者是否为目标接收者.提出了 3 种频谱扫描方式用于查询目标接收者:按导频音频率高低顺序扫描、按导频音功率高低顺序扫描和按导频音分布疏密程度顺序扫描.文献[70,71]采用特殊调制方式使信号在特定调制参数下表示出特定模式,便于收发双方搜索识别以建立通信链路.发送用户使用一组有特定相对幅值差别和相对频率偏移的离散导频音对传输通知信号进行幅度调制,该通知信号会发射在发送用户所发现的所有可用频段上,且每次发射的功率低,持续时间短.接收用户扫描所有可用频谱,收集所有频段上的信号样本,并使用基于快速傅里叶变换的特征探测器,在频域内通过相关检测识别通知信号的模式.根据接收到的通知信号强度、占用带宽以及其他信道统计特征,选取回复信号的载频,并在回复信号中附带自己的特有模式.发送用户接收到接收用户的回复信号后,选取最终信道的中心载频,使用合适的无线传输参数广播连接请求码.接收到连接请求码后,接收用户单播回复连接请求信息,附带自己能够提供的服务以及连接参数偏好信息,以实现链路建立.文献[72,73]根据人造通信系统 A/D 采样以及编码调制等功能的周期性特征会在信号中引入循环平稳特性的原理,构建次用户指纹.通过改变 OFDM 逆傅里叶变换器输入端连接线的连接模式(子载波映射模式),在信号中引入不同的循环平稳特征来标识网络中不同的次用户,使得发送用户能够利用时域周期自相关函数(cyclic autocorrelation function,简称 CAF)和频域相关密度函数(spectral correlation density,简称 SCD)识别自己目标接收用户的信号循环平稳特征(见公式(1)和公式(2)).

$$CAF:\hat{R}_x^a(\tau)=\lim_{\Delta t\to\infty}\frac{1}{\Delta t}\int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2}x(t+\tau/2)x(t-\tau/2)\mathrm{e}^{-i2\tau at}\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$SCD:S_x^a(f)=\lim_{\Delta f\to\infty}\lim_{\Delta t\to\infty}\frac{1}{\Delta t}\int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2}\Delta f X_{1/\Delta f}\left(t,f+\frac{a}{2}\right)X_{1/\Delta f}^{*}\left(t,f-\frac{a}{2}\right)\mathrm{d}t \tag{2}$$

以 SCD 函数为例,在改变子载波映射后,SCD 函数在循环频率 a 和信号频率 f 构成的二维空间中出现峰值的模式将会发生改变,这种峰值出现的模式即为信号的循环平稳特性.由于每个次用户的信号循环平稳特征不同,通过识别 SCD 函数峰值出现模式可以达到识别网络不同次用户的目的.

4.2.3 主要挑战

UWB 传输技术通过降低传输速率和多跳转发,可以弥补传输范围受限的不足,但是这两种方法都会增加控制报文传输时间开销.在使用专用公共控制信道实现网络组网时,数据报文传输时间开销和控制报文传输时间开销的比值决定了网络中有多少数据信道处于传输状态[74].当控制报文传输时间开销增大时,网络中处于传输状态的数据信道数量将减少,导致网络传输容量和可用频谱利用率降低.由于认知无线电网络可用信道数要远远多于传统多信道无线网络,采用 UWB 传输技术建立专用公共控制信道将极大地限制可用频谱利用率的提高.NC-OFDM 技术通过关闭子载波可以降低主用户对次用户传输的影响,以及避免次用户对主用户的干扰.然而,由于次用户感知主用户信号功率的大小依赖主次用户之间的相对位置,次发送用户和次接收用户的可用子载波数会不同.一旦次发送用户认为某个可用的子载波在次接收用户处受到主用户干扰,次接收用户将无法解码所有子载波上传输的数据.收发用户可用子载波视图不一致,是 NC-OFDM 传输技术面临的主要挑战.

采用信号指纹实现信道交汇面临的最大挑战是:次用户如何预先知道彼此的信号指纹特征,即信号指纹分配问题.如果依赖交汇信道实现信号指纹的分配,将会出现循环依赖问题.此外,信号指纹不仅给被动 jamming 攻击者提供了尾随攻击的条件,而且支持 jamming 攻击者对特定次用户发起攻击.为了搜寻目标用户的信号指纹,目前常采用宽频扫描方式提高搜寻效率,但是宽频扫描受硬件工艺、硬件复杂度及开销的限制.如何在窄频扫描方式下提高用户的搜寻效率,是一个有待研究的问题.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.3 面向接收者策略

4.3.1 基于接收者导向传输

在传统多信道无线网络中,研究者提出了一类基于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.文献[28]首次提出基于接收者导向传输(receiver directed transmission,简称 RDT)的概念,RDT 的基本思想是:网络中每个用户选择一个自己在空闲时驻留等待接收数据的静默信道,即用户在接收状态时的信道交汇点.当用户有数据需要发送时,将天线切换到目标接收者的静默信道上传输数据.文献[29]提出一种基于 RDT 概念的链路层协议.网络中用户使用多根天线提高多信道传输的并发度,并将这些天线分为固定天线和可切换天线两类.固定天线驻留静默信道用于接收数据,可切换天线在非静默信道之间切换实现在不同信道上发送数据,其信道切换频率要远远高于固定天线的信道切换频率.为了提高多信道传输的并发度,用户通过交互一跳邻居表(包含每个邻居的静默信道信息)维护两跳范围内的邻居表,使两跳范围内用户所选静默信道尽可能分散到网络所有信道上,以提高空间复用率.文献[30]中提出的 xRDT MAC 协议是对 RDT 的扩展,RDT 中用户只有一根天线,而 xRDT 为用户额外配置一根只发送忙音信号的天线.用户发送数据时,通过忙音天线阻止潜在发送用户给自己发送数据,解决 RDT 面临的多信道隐藏终端问题和聋问题.

4.3.2 静默信道宣传

面向接收者的信道交汇策略需要解决的首要问题是:用户如何将自己所选择的静默信道告诉网络中的其他用户,即静默信道宣传问题.文献[28,30]假设存在一种独立的机制可以完成静默信道的宣传,规避了静默信道宣传问题.文献[29]通过在所有信道上广播,告诉其他用户自己所选择的静默信道.由于认知无线电网络信道可用性是动态变化的,这种采用广播显性协调方式解决静默信道宣传问题的效率低下.

无协调方式成为解决认知无线电网络静默信道宣传问题的新方向.Xin 等人在文献[75−79]中提出了一系列采用无协调方式解决静默信道宣传问题的方法.文献[75]中,次用户拥有一个记录自己和自己所有邻居用户的可用信道集合的数据库:$[S_i(1),\ldots,S_i(M)]$表示第 i 个用户拥有的数据库,M 表示网络中所有节点数,$S_i(k)$是数据库中的一条记录,表示用户 i 记录用户 k 的可用信道集合,每条记录都有一个时间戳 $T_i(k)$用于及时更新记录.如果用户 k 不是邻居节点,则 $S_i(k)$为空集.当相邻用户在相同信道相遇时,他们彼此交互自己的数据库信息,更新自己数据库中的记录并完成时钟同步.例如,用户 i 接收到用户 j 发送的数据库信息后,对于所有的 $1\leqslant k\leqslant M$,如果用户 k 是用户 i 的邻居节点并且 $T_i(k)<T_j(k)$,则用户 i 更新 $S_i(k)=S_j(k)$,$T_i(k)=T_j(k)$.次用户用自己的 ID 作为伪随机发生器的种子,决定自己的静默信道,用户 i 的静默信道 $h_i(i)\in S_i(i)$.当有数据发送给用户 j 时,使用用户 j 的 ID 作为伪随机发生器的种子,估计用户 j 的静默信道 $h_i(j)\in S_i(j)$.这种受控随机方法相比于完全随机方法,可以将 $h_i(j)$成功估计为 $h_j(j)$的概率从 $\min\{1/|S_i(j)|,1/|S_j(j)|\}$提高到$|S_i(j)\cap S_j(j)|/|S_i(j)\cup S_j(j)|$.在 $S_i(j)=S_j(j)$的情况下,估计成功率为 1,并在 $S_i(j)$记录过期且和 $S_j(j)$差别不大的情况下依然保证很高的估计成功概率.虽然文献[75]不需要显性交互次用户所选择的静默信道信息,但是用户之间还是需要交互各自的可用信道集合信息.而文献[73−79]提出的解决静默信道宣传问题的方法不需要次用户之间交互任何信息,次用户通过频谱感知获得自己的可用信道集合,同样使用受控随机方法决定各自的静默信道.不同的是,用户 i 在估计用户 j 的静默信道 $h_j(j)$时使用自己的可用信道集合 $S_i(i)$,而不是通过交互才能获得的用户 j 的可用信道集合 $S_i(j)$.在这种情况下,静默信道估计成功率和文献[75]相同,其原因是邻居范围内次用户的可用信道集合相似.为了解决用户单天线面临的聋问题,Xin 在所有提出的方法中使用次用户 ID 和时槽值作为伪随机发生器的种子,决定自己的发送和接收状态.当某个次用户向目标接收用户发送数据时,使用目标接收用户的 ID 和时槽值便可查询该用户的状态,避免聋问题出现.ROAT[78]通过设计以时槽值为种子的伪随机发生器,让网络中一半次用户处于发送状态,另一半次用户处于接收状态,并通过多轮迭代选择收敛到让每个发送者对应一个接收者以达到最大化网络吞吐量的目的.文献[79]对多轮迭代选择过程进行优化,在减少迭代时间开销的同时,保证网络吞吐量接近最大值.

4.3.3 主要挑战

面向接收者的信道交汇策略面临的最大挑战是需要对网络中次用户进行发送者和接收者的角色分配,这在分布式网络中很难实现.虽然 Xin 通过伪随机发生器实现角色分配,但需要所有次用户时钟同步.在角色分配

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

不确定且每个次用户只使用一根天线的情况下,多信道隐终端和聋问题在 MAC 协议设计中将不可避免.

4.4 基于信道跳转序列策略

认知无线电设备优良的信道切换性能,使得信道跳转方式成为吸引研究者实现次用户盲信道交汇的一种途径,也是目前最为热门的研究方向.例如,微软亚洲研究院研制的 SORA[80]软件无线电平台,信道切换开销在 0.5μs~0.7μs 之间,而传统 802.11 设备的信道切换开销为毫秒级.基于信道跳转序列的信道交汇策略工作在时槽系统上,每个次用户按照序列产生算法构造自己的信道跳转序列,该序列决定了次用户信道跳转轨迹.一旦发送者和接收者通过信道跳转切换至同一信道,该信道成为发送者和接收者的交汇信道.根据信道跳转过程是否需要序列同步,基于信道跳转序列的策略可分为同步序列策略和异步序列策略.

4.4.1 同步序列策略

同步序列策略通过全局时钟同步可以调度网络用户的信道跳转过程,很容易实现用户信道交汇的目标,其中最典型是共同信道跳转策略.CHMA[81]最早将这种策略用于实现传统多信道无线网络的信道交汇.OSA-HCC[82]根据认知无线电网络的特点对 CHMA 略作改动,用于实现认知无线电网络的信道交汇.虽然共同信道跳转策略降低了次用户信道交汇的实现难度,但它无法获得多信道增益,因为所有次用户在同一时槽接入使用相同信道,造成每个时槽内只能建立一条通信链路,而浪费其他空闲信道资源.

为了解决共同信道跳转策略带来的负载不均衡的问题,文献[83]提出 SYN-ETCH 同步信道交汇策略,通过交汇调度和信道分配算法构造 $2N$ 个长度为 $2N-1$ 的信道跳转子序列,每个信道跳转子序列和其他 $2N-1$ 个信道跳转子序列的交汇信道以及同一时槽内所有子序列的交汇信道覆盖网络所有 N 个信道(如图 6 所示).为了保证每个信道都能成为交汇信道而实现公平接入,次用户的信道跳转序列由这 $2N$ 个信道跳转子序列随机拼接构成.文献[39]基于 Quorum 系统提出了 M-QCH 和 L-QCH 两种同步信道交汇策略.M-QCH 基于多数循环 Quorum 系统理论(定义见第 4.2.2 节的确定交汇策略),在避免网络所有次用户在某个时槽接入同一信道的限制下,最小化信道跳转序列的周期.L-QCH 基于少数循环 Quorum 系统理论,在特定信道跳转序列周期的限制下,最小化系统负载达到优化负载均衡的目的.QLCH[44]使用 Quorum 系统和 Latin 方阵构造信道跳转序列,交汇性能优于 SYN-ETCH 和 L/M-QCH.

Slot index:	1	2	3	4	5
S_1	0	1	2	0	2
S_2	1	1	0	2	0
S_3	2	0	2	2	1
S_4	2	2	1	0	0
S_5	1	0	1	1	2
S_6	0	2	0	1	1

Fig.6 Channel-Hopping sub-sequences of SYN-ETCH with 3 channels[83]

图 6 在 3 个信道情况下的 SYN-ETCH 信道跳转子序列[83]

4.4.2 异步序列策略

为了避免时钟同步带来的控制开销,研究者提出了一类异步序列策略以实现在时钟异步条件下完成信道交汇.按能否在有限时间内找到交汇信道,可将异步序列策略分为概率交汇策略和确定交汇策略.

(1) 概率交汇策略

概率交汇策略的最简单实现方式是,发送者和接收者采用纯随机信道跳转模式[17].假设网络总共有 N 个信道,则在每个时槽内,发送者和接收者切换到相同信道的概率是 $1/N$,完成一次信道交汇所耗费的期望时槽数为 N.为了降低随机信道跳转完成信道交汇所耗费的平均时间,研究者对随机信道跳转方式进行改进.文献[84]设计的随机信道跳转策略适合不知道网络的总信道数的情况,次用户在预设正整数范围内随机选择信道驻留时

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

槽数,通过变化次用户信道切换速率和信道驻留时间,增加次用户信道交汇的概率.文献[85]所设计的最优策略也不用知道网络的信道总数,令发送和接收用户传输范围内的信道可用概率分别为 p_1 和 p_2,两个次用户传输范围之外的信道可用概率为 q.在信道数 $N>>1/(p_1p_2q)$且收发双方都知道 p_1,p_2 和 q 情况下,如果发送和接收用户在每个时槽内随机选择的信道在各自可用信道集合上满足几何分布 $Geom(p_1q/6)$和 $Geom(p_2q/6)$,则信道交汇所耗费平均时槽数为 $O(1/(p_1p_2q^2))$.在信道数 $N>>1/(p_1p_2q)$且收发双方只知道自己的信道可用概率的情况下,收发双方使用相同几何分布的信道选择策略时,信道交汇所耗费的平均时槽数是 $O(1/(p_1p_2q^2)\log^{2+\theta}(1/(p_1p_2q^2)))$.概率交汇异步序列策略的缺陷是无法保证交汇信道能在有限的时间内出现,即收发双方之间不存在最大信道交汇时间 MTTR.

(2) 确定交汇策略

确定交汇策略的基本思想是:通过设计有周期性结构化特点的序列,保证收发双方在时间异步情况下依然存在最大信道交汇时间.这个目的通过设计有轮转闭包特性[39]的周期序列达到.

定义 3(轮转闭包特性,rotation closure property). 用 L_S 和 L_R 分别表示发送用户 S 和接收用户 R 的信道跳转序列,用 $C(L_S,L_R)$表示 L_S 和 L_R 在一个周期内出现的交汇信道数(即重叠度),$rotate(L_S,i)$表示 L_S 循环左移(或循环右移)i 个时槽后得到的序列.信道跳转序列具备轮转闭包特性需要满足以下条件:

$$\forall i,j\in\mathbb{N},C(rotate(L_S,i),rotate(L_R,j))\geqslant c,c \text{ 为某一正整数.}$$

研究者使用 Quorum 系统理论、非正交序列理论、素数模运算理论以及其他组合学理论构造具备轮转闭包特性的信道跳转序列.

1) Quorum 系统理论

定义 4(Quorum 系统). 给定有限整数全集 $Z_n=\{0,...,n-1\}$,构建在全集 Z_n 上的 Quorum 系统 S 是一个以非空集合为元素的集合,其元素满足相交特性:$\forall p,q\in S$ 且$\forall p,q\subset Z_n,p\cap q\neq\varnothing$.$S$ 中的每个元素称之为 quorum.

构造在 Z_3 上的集合 $S=\{\{0,1\},\{0,2\},\{1,2\}\}$就是一个 Quorum 系统,其构造的信道跳转交汇系统如图 7 所示.

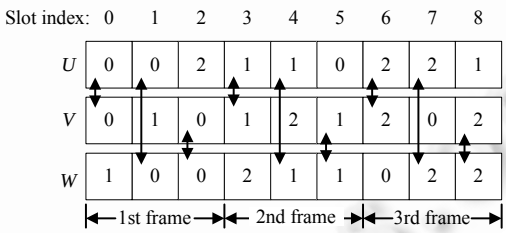


Fig.7 Quorum-Based channel hopping system[39]

图 7 基于 Quorum 系统的信道跳转交汇系统[39]

A-QCH[39]首次基于 Quorum 系统元素的相交特性设计确定交汇策略,通过将某一宽松循环差集 $D(n,k)\subset Z_n$ (k 为循环差集 D 的元素个数)进行模加运算得到的所有集合作为元素构造序列产生所依赖的 Quorum 系统,该 Quorum 系统称为循环 Quorum 系统.

定义 5(宽松循环(n,k)差集). 集合 $D=\{a_1,a_2,\ldots,a_k\}\subset Z_n$ 是宽松循环(n,k)差集应满足,对任意 $d\in\{1,...,n-1\}$,至少存在一个由 D 中两个元素组成的有序二元组(a_i,a_j),使得 $a_i-a_j\equiv d \pmod n$.

循环 Quorum 系统由所有集合 $D_i=D+i(\text{mod } n)$组成,其中,$i\in Z_n$.例如,$D=\{0,1,3\}$是一个宽松循环(7,3)差集,$S=\{D_0,D_1,\ldots,D_6\}$是一个循环 Quorum 系统.对于任意集合 $D\subset Z_n$,如果其所含元素个数为$\left\lceil\frac{n+1}{2}\right\rceil$,则该集合为宽松循环差集.如上述例子中 D 的补集 $\bar{D}=\{2,4,5,6\}$ 是一个宽松循环(7,4)差集,其构造的循环 Quorun 系统称为多数循环 Quorun 系统,而由 D 构造的循环 Quorun 系统称为少数循环 Quorun 系统.

然而,A-QCH 使用少数循环 Quorum 系统和多数循环 Quorum 系统构造的信道跳转序列只适合信道数 $N=2$ 的网络场景.Romaszko 等人利用 Quorum 系统理论的变种提出了 gQ-RDV[86],tQS-RDV[87]和 tQS-DSrdv[88]信道

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

交汇策略,这 3 种策略都可用于网络信道数 $N\geqslant 2$ 的网络场景.gQ-RDV 基于网格(grid-based)Quorum 系统理论构造信道交汇序列,tQS-RDV 基于圆环面(torus-based)Quorum 系统理论设计信道跳转序列,tQS-DSrdv 在 tQS-RDV 基础上引入差集理论设计信道跳转序列结构,但是它们都无法保证完全交汇.A-MOCH[89](又称 optimal ACH[46])基于方阵(array-based)Quorum 理论,使用 Latin 方阵给次发送用户设计信道跳转序列和 Row-identical 方阵给次接收用户设计信道跳转序列.A-MOCH 在保证完全交汇条件下使序列周期长度达到理论最小值 N^2,但是 A-MOCH 基于角色系统模型,需要区分次用户角色.

2) 非正交序列理论

非正交序列在时钟异步的情况下能让两个次用户在一个周期内找到公共信道.GOS[90]是最早实现确定交汇的研究工作,其构造非正交序列的方式是:将网络所有 N 个信道随机排列得到长度为 N 的排列 P,将 P 中的 N 个元素依次插到 N 个排列 P 的第 1 个元素之前,并拼接成信道跳转序列的一个周期.例如,当 N=3 时得到排列 P={123},则 GOS 信道跳转序列的一个周期为{**1**123**2**123**3**123}.Ring-Walk[91]将网络所有信道按信道标签由低到高组成一个环形结构,每个次用户按照环形结构依次访问每个信道.次用户的信道驻留时间由自己 MAC 地址决定,因而,不同次用户的信道跳转速率不同,信道跳转速率的差别保证了两个用户一定能够在有限时间内相遇在环形结构的某个信道中.文献[45]提出基于比特序列设计非正交信道跳转序列,每个次用户将 m 位全 0 比特序列,m 位全 1 比特序列和唯一标识自己的 m 位 ID(例如 48 位的 MAC 地址)拼接成 $3m$ 位的扩展 ID.扩展 ID 对于每个用户是唯一的,并且两个用户的扩展 ID 经过任意循环移位操作之后也不可能相同.将扩展 ID 中的比特 1 用 2 个周期长度的序列(基于 Latin 方阵生成)替换,比特 0 用 2 个周期长度序列(基于 row-identical 方阵生成)替换.由于不同用户的扩展 ID 不同,必有一个扩展 ID 中的某个为 1 比特对应另一个扩展 ID 中的为 0 比特,从而不仅保证交汇信道的出现,而且保证完全交汇,弥补了 A-MOCH 需要区分用户发送和接收角色的不足.

3) 素数模运算理论

MC(modular clock)和 MMC(modified modular clock)算法[17]首次采用素数模运算理论设计信道跳转序列,其素数模运算模值 p 为大于自己可用信道总数 N 的最小素数.在 MC 算法中,次用户 i 在第 t 个时槽内切换到的信道由素数模运算公式(3)决定:

$$C_i^t = t\cdot r_i + C_i^0 \bmod (p_i) \tag{3}$$

其中,r_i 表示次用户 i 的跳转步长,C_i^0 表示次用户 i 的初始选择信道.共享系统模型(两个次用户所感知的可用信道集合相同,且相同物理信道的标签也相同)下,次用户素数模运算的模值相同.MC 算法能保证信道交汇双方在信道跳转步长不同的情况下,交汇信道在 p 个时槽内出现(见文献[17]的定理 2).但是在收发用户初始选择信道不同且跳转步长相同的情况下,MC 算法无法保证确定交汇(见文献[17]的命题 3).在个体系统模型(不同次用户所感知的可用信道集合不同,且相同物理信道的标签可能不同)下,为了实现任意两个次用户(次用户 1 和次用户 2)确定交汇,需存在时槽 t,满足:在任意信道标签 C_1^0,C_2^0,C_1^t 和 C_2^t、跳转步长 r_1 和 r_2 以及素数 p_1 和 p_2 情况下:

$$\begin{cases} C_1^t \equiv t\cdot r_1 + C_1^0 \bmod (p_1) \\ C_2^t \equiv t\cdot r_2 + C_2^0 \bmod (p_2) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t \equiv r_1^{-1}(C_1^t - C_1^0) \bmod (p_1) \\ t \equiv r_2^{-1}(C_2^t - C_2^0) \bmod (p_2) \end{cases} \tag{4}$$

根据中国剩余定理,在 p_1 和 p_2 互质(p_1 不等于 p_2)时,满足公式(4)的 t 值存在.为了让两个次用户所选择的模值不同,MMC 算法让次用户在$[N_i,2N_i]$中随机选择模值 p_i,其中 N_i 表示次用户 i 的可用信道总数.文献[18,19]提出的 JS-2-SM 和 JS-2-AM 分别基于共享系统模型和个体系统模型,它们弥补了 MC 算法和 MMC 算法在共享系统模型和个体系统模型特定情况下无法保证确定交汇的不足.其信道跳转序列周期由 jump 阶段和 stay 阶段组成:jump 阶段的序列结构由素数模运算决定,而 stay 阶段所停留的信道由信道跳转步长决定.JS-2-SM 无法保证完全交汇,而 JS-2-AM 能保证完全交汇,但是 JS-2-AM 的周期远大于 JS-2-SM 的周期.为了弥补 JS-2-AM 序列周期长的不足,文献[92,93]基于素数模运算提出了新的序列构造方法.

4) 其他理论

ASYN-ETCH[83]结合素数模运算和非正交序列构造信道跳转序列:素数模运算用于将网络 N 个信道组成

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

N–1 个不同排列;非正交序列策略 GOS 用于将 N–1 个不同排列组成 N–1 个不同信道跳转子序列,每个次用户的信道跳转序列由这 N–1 个不同信道跳转子序列随机拼接构成,以实现确定交汇.文献[40]使用组合学 BIBD (balanced incomplete block design)理论构造信道跳转序列.BIBD 将 v 个不同对象组成 b 个序列,每个序列仅包含 k 个不同对象,每个对象仅在 r 个不同序列中出现,并且任意两个不同对象仅在 u 个序列中同时出现,$BIBD\{v,b,r,k,u\}$满足:$bk=vr$,$r(k-1)=u(v-1)$.图 8 是 $BIBD\{7,7,3,3,1\}$示意图,其中,不同时槽表示不同对象并分为活跃(灰色标识)和不活跃两类.C_1 和 C_2 表示两个不同信道,分别放置在两类不同的时槽中,这时,BIBD 只能工作在 N=2 的网络场景中.为了能工作在 $N\geqslant 2$ 的网络场景,作者提出了单序列 MAC 协议和多序列 MAC 协议.DRSEQ[94]所设计的信道跳转序列在一个周期内,信道以该周期中心时槽为镜面呈对称排列,周期中心时槽可以放置任何信道,在 $2N$+1 个时槽长度内保证任意两个信道跳转序列能够出现一个交汇信道.CRSEQ[95]利用三角形数和中国剩余定理设计信道跳转序列,该序列可以工作在个体系统模型下,在 $N(3N-1)$个时槽长度内保证出现一个交汇信道.

Time slots (objects)

Sequences (blocks)

	1	2	3	4	5	6	7
1	C_1	C_1	C_2	C_1	C_2	C_2	C_2
2	C_2	C_1	C_1	C_2	C_1	C_2	C_2
3	C_2	C_2	C_1	C_1	C_2	C_1	C_2
4	C_2	C_2	C_2	C_1	C_1	C_2	C_1
5	C_1	C_2	C_2	C_2	C_1	C_1	C_2
6	C_2	C_1	C_2	C_2	C_2	C_1	C_1
7	C_1	C_2	C_1	C_2	C_2	C_2	C_1

Fig.8 Illustration of $BIBD\{7,7,3,3,1\}$[40]

图 8 $BIBD\{7,7,3,3,1\}$示例图[40]

4.4.3 主要挑战

基于信道跳转序列的确定交汇策略都是在信道可用且不变的情况下保证交汇时间有界,但在考虑主用户活动影响时,它们并不是一种时效高的策略[42],这时,最大交汇时间将是随机变量[96].基于信道跳转序列交汇策略的优势是每个次用户只需要配置一根天线,但在认知无线电网络这种信道数多且信道可用性动态变化的网络中,交汇搜索的时延开销将非常大.通过多天线提高搜索能力,是一种提高搜索效率的途径[97,98],但是需要考虑多天线带来的天线间干扰[99,100]以及成本高的问题.此外,由于基于信道跳转序列的确定交汇策略都是依据特定算法设计的有结构序列,序列结构极易被 jamming 攻击者通过信道探测破解,以提高攻击效果[101,102].

4.5 基于分簇/分组策略

研究者利用邻居范围内次用户可用信道集合的相似性[103]提出了基于分簇/分组交汇策略,将邻居范围的次用户组织成簇结构或组结构,并建立覆盖簇/组范围的交汇信道.

4.5.1 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,在网络簇结构内,簇头扮演了集中控制器的角色,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.CogMesh[104]首先在认知无线电网络中提出采用簇结构协调用户通信,通过信道扫描和 Beacon 报文广播等邻居发现过程,构造以簇头为中心的单跳簇结构.在分簇算法中,由于簇头是第 1 个发起 Beacon 报文广播的次用户,这种随机产生簇头的方式会导致无法实现最优网络分簇结构.为了最小化网络簇数量,达到降低簇间协调开销的目的,文献[105]使用最小支配集理论对网络簇结构进行优化,但在分布式环境下,构造簇头最小支配集所需控制开销非常高,并且在有主用户活动影响以及 jamming 攻击存在的情况下,这种网络簇结构恢复以及稳定的难度非常大.DCP-CCC[106]中所构造的是以簇头为中心的多跳簇结构,可以进一步减少网络的簇数量.在选择簇内交汇信道时,综合考虑每个信道上主用户出现概率、主用户不活动时间以及每个信道所接入的用户数,达到降低主用户活动影响的目的.最小化网络簇数量虽然有助于提高网络信息传输效率,但是随着簇范围的不断扩大,簇内将只有一个可用公共信

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

道.当簇内当前交汇信道不可用时,网络需要重新启动分簇过程,簇维护的开销将增加.因此,簇覆盖范围和簇维护开销之间存在平衡问题.SOC[107]将簇覆盖范围和簇维护开销之间的平衡问题形式化成最大边二部团问题,每个次用户以最大化二部团内的连接数为目标寻找二部团,彼此交互自己所构造的二部团信息,并对比各自二部团的用户数以及信道数,直至收敛到一个最优二部团,即最佳分簇结构(如图 9 右图所示,网络最终收敛到以用户 A,E 和 H 为簇头的 3 个最佳簇结构).图 9 左图所示二部团 $Q_A(X_A,Y_A)$对应图 9 右图中以用户 A 为簇头的簇结构,簇用户集合 $X_A=\{A,B,C,D,G\}$,簇内所有用户的公共可用信道集合 $Y_A=\{1,2,3\}$.由于簇内存在冗余公共可用信道,在当前交汇信道被主用户占用时,整个簇内用户可以切换到其他交汇信道上而无需重新启动分簇过程,降低了簇结构维护开销.但是,实现整个簇内用户信道切换,除了依赖相应的信道跳转策略,还依赖严格簇内同步.

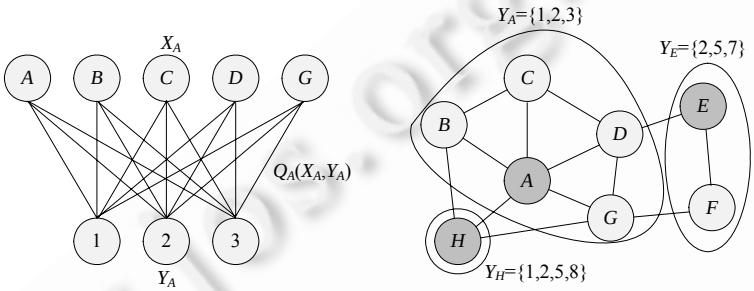


Fig.9 Maximum edge biclique based clustering scheme[107]

图 9 基于最大边二部团的网络分簇策略[107]

4.5.2 分组策略

分组是一种以平面结构组织邻居范围内用户的方法,且组内每个用户的身份都是对等的.文献[103]是最早根据邻居范围内次用户可用信道相似性提出基于邻居协调分组策略的研究工作.通过邻居发现过程,每个次用户获得自己的邻居用户列表以及邻居次用户的可用信道信息,并以最大连通性(共享同一信道的用户数最多)为目标,从自己可用信道集合中选择候选交汇信道.次用户通过广播将自己的投票信息(即选择的候选交汇信道)告诉自己的所有邻居用户,并根据接收到的邻居投票信息调整自己的候选交汇信道,通过多轮迭代,最大化邻居范围内使用同一信道作为交汇信道的次用户数.但是,最大化组内次用户数量会最小化组内的公共可用信道数,当组内的交汇信道被主用户占用后,需要重新通过广播投票和多轮迭代的方式产生新的组结构,导致增加组维护开销.文献[108]受群体智慧启发,提出信道云(channel cloud)的概念对网络用户进行分组,选择相同主信道且相互连通的用户构成信道云.邻居范围内,每个次用户所选择的主信道将作为组内交汇信道的候选信道,并根据可用信道质量以及邻居用户主信道的选择结果调整自己主信道选择决策.为了加快收敛邻居范围内用户选择相同主信道的过程,次用户周期性广播 HELLO 报文,将自己对可用信道按信道质量排序后的信息(又称信息素)传递给周围邻居用户.然而,位于组边界的次用户会因邻居用户广播的信息素差异而出现主信道选择抖动的问题.此外,主信道选择决策-广播决策结果-调整主信道选择决策的多轮迭代方式,会给重新分组造成非常高的维护开销.在 ERCC[43]中,邻居范围内次用户将自己的可用信道按可用性从高到低构造信道排序列表,并通过广播将可用信道排序表告诉邻居用户.次用户接收到邻居用户的可用信道排序表后,依据信道共享用户的数量对自己的可用信道列表进行调整.通信时,次用户按自己可用信道排序列表的顺序选择信道.由于邻居范围内用户的信道排序列表相似,这种信道选择方式不仅可以让邻居范围的次用户选择可用性最高的信道作为交汇信道,而且有利于扩大交汇信道覆盖范围.此外,可用信道排序列表也是备用信道列表,实现高效组内交汇信道恢复.

4.5.3 循环依赖消除

基于分簇/分组的信道交汇策略由两个阶段组成:(1) 邻居用户之间交互频谱信息以提供网络簇/组结构构造依据;(2) 建立覆盖簇/组范围的交汇信道,用于簇内/组内数据传输.如果第 1 个阶段的信息交互依赖于第 2 个阶段构造的交汇信道,将出现循环依赖问题.消除这种循环依赖关系,需要解决在不存在覆盖簇/组范围的交汇

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

信道下,邻居范围内的次用户如何高效共享信息,使邻居范围内所有次用户的频谱信息视图一致的问题.

目前,基于分簇/分组的信道交汇策略在解决上述问题时,都依赖在多个信道上重复广播的传统方法[109,110]实现邻居用户之间的频谱信息共享.这种显性信息交互方式在认知无线电网络不仅开销高,而且效率低下.Baldo 等人提出了一类基于网络编码技术的信道交汇策略 MCMA[111],CAN-DSA[112]和 NC4[113].这 3 种信道交汇策略都基于 TDMA,每个 TDMA 时间帧分为多个时槽,每个时槽分为传输数据的子时槽和传输控制信息的子时槽两部分.每个用户在本地维护频谱视图,即传输调度矩阵和信道选择矩阵.传输调度矩阵记录当前 TDMA 时间帧的每个时槽内不同信道上的用户信息,用户根据自己在该矩阵中的信道和时槽信息传输数据信息.信道选择矩阵记录当前 TDMA 时间帧的每个时槽内不同用户所在的信道信息,用户根据自己在该矩阵中的信道和时槽信息传输控制信息.通过对邻居范围内次用户的这两个矩阵信息同步,可以避免多个次用户使用相同信道导致数据传输冲突,但前提是前一 TDMA 时间帧内次用户的控制信息需要能够成功发送给所有其他邻居用户.采用网络编码技术,次用户可将缓存接收到的多个控制信息利用自己产生的编码矢量进行编码,并将编码矢量和编码后的控制信息传递给与自己在同一信道上的邻居用户.次用户在接收到一定数量的编码控制信息后,利用捎带的编码矢量解码获得多个次用户传输的控制信息,不仅提高了传递的成功率,而且降低了传输总量.

Doerr 等人受昆虫和鱼群社会行为启发,提出一种不依赖显性信息交互而实现同步邻居范围内次用户行为的协调策略[114,115],将自然界的群体涌现行为映射到认知无线电网络环境,达到在没有控制信息交互的情况下同步邻居范围用户行为的目的.当外部环境发生改变(主用户信号或jamming攻击出现)时,群体中只有部分用户能够感知到这种环境变化并切换工作信道,其邻居用户通过被动观察环境变化并发现有用户切换信道时,也跟随切换到相同信道,最终,整个邻居范围内次用户切换到一个新的公共可用信道上.基于群体行为的协调策略不需要用户在信道切换前进行显性信息交互,有利于降低同步用户的控制开销.然而,在没有显性信息交互的情况下如何减少整个群体从一个信道切换到其他公共可用信道的时延,是一个值得研究的问题.

4.5.4 主要挑战

相比于基于接收者导向策略和基于信道跳转序列策略,在基于分簇/分组策略的簇/组内,次用户使用同一交汇信道能够提高多个次用户之间的广播效率.然而,覆盖簇/组范围的交汇信道在被主用户占用或遭到 jamming 攻击后,簇/组内次用户重建簇/组结构需要付出更高的控制开销代价.此外,由于相邻簇或组会使用不同的交汇信道,如何实现簇/组间通信,成为基于分簇/分组信道交汇策略面临的另一挑战.文献[116]针对以上两类挑战,在认知传感器网络中提出了按需受控分簇策略,但需依赖较多前提条件(如全网次用户地理位置等信息)支持策略实现.

5 开放性问题

根据上述对认知无线电网络信道交汇策略的研究工作综述,还存在以下开放性问题待研究解决:

(1) 服务质量(quality of service,简称 QoS)

无线网络信道质量的动态变化,使得保障 QoS 成为无线网络组网协议设计的难点,而认知无线电网络频谱资源动态可用特性进一步提高了 QoS 保障的难度.目前,针对认知无线电网络设计有 QoS 保障的 MAC 协议还处在待研阶段,而仅有的研究工作[117−119]都没有考虑信道交汇策略对组网协议 QoS 的影响.认知无线电网络数以百计的信道数(IEEE 802.22 工作组所制定的 WRAN 标准中,TV 频段范围为 54MHz~862MHz,信道带宽为 6MHz)使得提高交汇时间效率成为信道交汇策略保障组网协议 QoS 的主要设计目标.然而,现有研究工作都假设两个或多个次用户在切换到同一个信道便能成功建立交汇信道,忽略了控制开销和多用户竞争对交汇时效的影响.最具代表性的是基于信道跳转序列的异步确定交汇策略,其保证确定交汇都没有考虑主用户活动和多用户竞争的影响.我们在文献[120]中基于现有异步序列策略设计了相应的 CH-CSMA/CA MAC 协议.通过研究发现:在考虑主用户活动和多用户竞争影响因素时,即使对 802.11 DCF 机制进行改进,现有异步确定交汇策略仍然会严重影响组网协议性能的提高,反而是异步概率交汇策略[121,122]具备对主用户活动和多用户竞争更好的鲁棒性.在文献[42]中,我们提出的基于邻居协作的信道交汇框架可以有效提高现有异步确定交汇策略的时间效

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

率.在未来研究工作中,我们将结合这两个研究工作为基于异步确定交汇策略的组网协议提供 QoS 保障.

(2) 信道检测

认知无线电技术灵活的频谱使用特性,使得不同次用户根据本地网络环境选择不同通信参数(如调制方式、信道中心频率和信道频宽等).使用不同通信参数的次用户如何完成信道交汇并建立通信链路,是认知无线电网络信道交汇策略设计面临的最根本性问题.现有信道交汇策略的设计都基于全网次用户使用相同通信参数的前提假设,无需信道检测技术支持.文献[123]提出了一种新的物理层启动协议,通过使用通断键控信号(on-off keying signaling,简称 OOK)和能量检测实现次用户之间的初始通信,完成调制方式的协商,在信道交汇的信道检测技术上迈出了第一步,但是它仍假设已知次用户能使用的多个信道中心频率和频宽.

随着信道聚合技术的提出,次用户通过聚合主用户活动导致的频谱碎片为数据传输提供理想的信道容量,能够进一步提高频谱利用率.然而,信道聚合这种动态信道化技术将使次用户所使用的信道中心频率和频宽信息无法事先确定,极大地提高了次用户信道交汇的复杂性.WhiteFi[124]在 TV 频段实现了一种类 Wi-Fi 组网机制,将信道聚合考虑到组网实现中.但是,WhiteFi 采用集中式网络体系结构和离散化的信道聚合方式,降低了信道交汇和组网难度.因此,在信道聚合技术下研究信道交汇策略设计,特别是在分布式认知无线电网络中研究信道交汇策略设计,将是一个极具挑战的问题.作为信道交汇的基础技术,信道检测技术的研究还处于空白状态.

(3) 智能交汇策略

主用户活动的特征决定了信道的动态可用性,这需要信道交汇策略采用不同方式适应信道可用性的动态变化.现有的信道交汇策略都无法适宜所有网络场景,例如:在主用户活动对频谱占用变化不大时,网络的可用信道将处于一种准静态状态,基于分簇/分组的信道交汇策略能够避免重新分簇或重新分组带来的高控制开销弊端,而充分发挥簇内/组内使用同一交汇信道带来的高传输效率优势;反之,基于接收者导向和基于信道跳转序列的信道交汇策略将是合理选择.然而,主用户的活动特征很难刻画,到目前为止,也没有一个被广泛接受的主用户活动模型,因此需要设计一种具备学习能力的信道交汇策略,实现次用户智能完成信道交汇并紧密耦合主用户活动特征,平衡好可用信道探索和使用之间的关系.

(4) 定向传输

次用户利用定向天线或波形成束(beamforming)技术实现定向传输,将传输能量限定在天线主瓣范围内,不仅实现次用户和主用户的数据并发传输,而且能提高邻居范围内次用户的并发链路数,有利于提高网络容量.此外,传输能量集中在特定方位角上,能提高次用户的传输范围以及传输质量.然而,定向传输给认知无线电网络组网带来的不利影响也是显而易见的.次用户要建立通信链路,需要将定向天线或波形成束的方位角调整到接收用户所处的位置上.如果接收用户也使用定向天线接收,还需要接收用户将定向天线方位角也调整到发送用户所处位置上.因此,定向传输增加了信道交汇策略设计的空域复杂度,使得信道交汇策略设计需要考虑在同一时间内实现收发双方在频域和空域上实现交叠.

(5) 能耗约束

无线设备通常都是能量受限设备(如传感器设备和手持设备),使得降低设备能量损耗成为无线网络组网协议的一个重要设计目标.设备休眠是降低能耗的重要手段,由此也产生了一类基于占空比感知的无线网络组网协议.在采用休眠方式降低网络能耗的认知无线电网络中,设计信道交汇策略时需要额外考虑如何保证在同一时间内使收发双方都处于活跃状态.随着“绿色”网络概念[125]的提出,设计兼顾能耗约束的信道交汇策略以及组网协议,将是一个很有前景的研究方向.

6 总 结

随着对认知无线电网络研究的深入,如何实现高效组网,成为摆在认知无线电网络投入实用道路上需要解决的迫切问题.作为实现认知无线电网络组网最基础且必不可少的组成部分,信道交汇研究的意义重大.本文对认知无线电网络信道交汇策略相关研究工作从信道交汇研究的挑战、分类标准及系统模型、实现策略以及开放性问题等方面进行分析和总结,重点对盲信道交汇策略这个热点研究方向进行详细剖析,并指出策略设计中

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的循环依赖问题,希望能为研究者设计更加实用的信道交汇策略直至最终推动认知无线电网络组网及实际部署给出有意义的启示.

致谢 在此,感谢国防科学技术大学网络工程系胡罡博士对我们工作的指导.特别感谢我们家人以及国防科学技术大学并行与分布处理国家重点实验室无线与普适计算课题组的老师和同学们的鼓励和大力支持.

References:

[1] Mitola J III, Maguire GQ Jr. Cognitive radio: Making software radios more personal. IEEE Journal on Personal Communications, 1999,6(4):13−18. [doi: 10.1109/98.788210]

[2] Haykin S. Cognitive radio: Brain-Empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201−220. [doi: 10.1109/JSAC.2004.839380]

[3] Akyildiz IF, Lee WY, Vuran MC, Mohanty S. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks, Elsevier, 2006,50(13):2127−2159. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.05.001]

[4] Akyildiz IF, Lee WY, Chowdhury KR. CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 2009,7(5):810−836. [doi: 10.1016/j.adhoc.2009.01.001]

[5] Zhao Q, Sadler BM. A survey of dynamic spectrum access. IEEE Signal Processing Magazine, 2007,24(3):79−89. [doi: 10.1109/MSP. 2007.361604]

[6] Chen KC, Prasad R, Wrote; Xu FM, Li HS, Trans. Cognitive Radio Networks. Beijing: Machinery Industry Press, 2011. 231−275 (in Chinese).

[7] Akyildiz IF, Lo BF, Balakrishnan R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. Physical Communication, 2011,4(1):40−62. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187449071000039X [doi: 10.1016/j.phycom.2010.12.003]

[8] Liang YC, Chen KC, Li GY, Mähönen P. Cognitive radio networking and communications: An overview. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2011,60(7):3386−3407. [doi: 10.1109/TVT.2011.2158673]

[9] Alpern S, Baston VJ, Essegaier S. Rendezvous search on a graph. Journal Applied Probability, 1999,36(1):223−331. http://www.jstor.org/stable/3215416 [doi: 10.1239/jap/1032374243]

[10] Rawicz PL, Kalata PR, Murphy KM. On the stability of mobile robot rendezvous. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Intelligent Control. 1998. 570−575. [doi: 10.1109/ISIC.1998.713735]

[11] Conte G, Pennesi P. The rendezvous problem with discontinuous control policies. IEEE Trans. on Automatic Control, 2010,55(1): 279−283. [doi: 10.1109/TAC.2009.2037249]

[12] Alpern S, Gal S. The Theory of Search Game and Rendezvous. Springer-Verlag, 2003. 165−177.

[13] Mo J, So HSW, Walrand J. Comparison of multi-channel MAC protocols. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008,7(1):50−65. [doi: 10.1109/TMC.2007.1075]

[14] Pawelczak P, Pollin S, So HSW, Motamedi A, Bahai A, Prasad R, Hekmat R. State of the art in opportunistic spectrum access medium access control design. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom). 2008. 1−6. [doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562475]

[15] Pawelczak P, Pollin S, So HSW, Bahai A, Prasad R, Hekmat R. Comparison of opportunistic spectrum multichannel medium access control protocols. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. 2008. 1−6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.591]

[16] Lo BF. A survey of common control channel design in cognitive radio networks. Physical Communication, 2011,4(1):26−39. [doi: 10.1016/j.phycom.2010.12.004]

[17] Theis NC, Thomas RW, DaSilva LA. Rendezvous for cognitive radios. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2011,10(2):216−227. [doi: 10.1109/TMC.2010.60]

[18] Cormio C, Chowdhury KR. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks. Ad Hoc Networks, 2009,7(7):1315−1329. [doi: 10.1016/j.adhoc.2009.01.002]

[19] Marinho J, Monteiro E. Cognitive radio: Survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions. Wireless Networks, 2012,18(1):147−164. [doi: 10.1007/s11276-011-0392-1]

[20] Lin ZY, Liu H, Chu XW, Leung YW. Jump-Stay based channel-hopping algorithm with guaranteed rendezvous for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2011. 2444−2452. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935066]

[21] Liu H, Lin ZY, Chu XW, Leung YW. Jump-Stay rendezvous algorithm for cognitive radio networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2012,PP(99):1. [doi: 10.1109/TPDS.2012.22]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[22] Su H, Zhang X. CREAM-MAC: An efficient cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol for wireless networks. In: Proc. of the World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). 2008. 1−8. [doi: 10.1109/WOWMOM.2008.4594853]

[23] Su H, Zhang X. Opportunistic MAC protocols for cognitive radio based wireless networks. In: Proc. of the 41st Annual Conf. on Information Sciences and Systems (CISS). 2007. 363−368. [doi: 10.1109/CISS.2007.4298329]

[24] Hamdaoui B, Shin KG. OS-MAC: An efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008,7(8):915−930. [doi: 10.1109/TMC.2007.70758]

[25] Jia J, Zhang Q, Shen XM. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(1):106−117. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080110]

[26] Le L, Hossain E. OSA-MAC: A MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). 2008. 1426−1430. [doi: 10.1109/WCNC.2008.256]

[27] McDermott-Wells P. What is bluetooth? IEEE Potentials, 2005,23(5):33−35. [doi: 10.1109/MP.2005.1368913]

[28] Shacham N, King PJB. Architectures and performance of multichannel multihop packet radio networks. IEEE Journal on Selected Areas of Communication, 1987,5(6):1013−1025. [doi: 10.1109/JSAC.1987.1146609]

[29] Kyasanur P, Vaidya NH. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks. ACMSIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2006,10(1):31−43. [doi: 10.1145/1119759.1119762]

[30] Maheshwari R, Gupta H, Das SR. Multichannel MAC protocols for wireless networks. In: Proc. of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). 2006. 393−401. [doi: 10.1109/SAHCN.2006.288495]

[31] Ma LP, Han XF, Shen CC. Dynamic open spectrum sharing for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). 2005. 203−213. [doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542636]

[32] Ma LP, Shen CC, Ryu B. Single-Radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 2nd IEEE DySPAN. 2007. 547−558. [doi: 10.1109/DYSPAN.2007.78]

[33] IEEE 802.22 working group. http://www.ieee802.org/22/

[34] Jiao L, Li FY. A single radio based channel datarate-aware parallel rendezvous MAC protocol for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE 34th Conf. on Local Computer Networks (LCN). 2009. 392−399. [doi: 10.1109/LCN.2009.5355152]

[35] Song Y, Xie J. A QoS-based broadcast protocol for multi-hop cognitive radio ad hoc networks under blind information. In: Proc. of IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2011. 1−5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134457]

[36] Song Y, Xie J. A distributed broadcast protocol in multi-hop cognitive radio ad hoc networks without a common control channel. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2012. 2273−2281. [doi: 10.1109/INFCOM.2012.6195614]

[37] Ji SL, Beyah R, Cai ZP. Minimum-Latency broadcast scheduling for cognitive radio networks. In: Proc. of the 10th Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). 2013. 389−397. [doi: 10.1109/SAHCN.2013.6645009]

[38] Song Y, Xie J, Wang XD. A novel unified analytical model for broadcast protocols in multi-hop cognitive radio ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2013,PP(99):1−1. [doi: 10.1109/TMC.2013.60]

[39] Bian K, Park JM, Chen R. A quorum-based framework for establishing control channels in dynamic spectrum access networks. In: Proc. of the ACM MobiCom. 2009. 25−36. [doi: 10.1145/1614320.1614324]

[40] Altamimi M, Naik K, Shen XM. Parallel link rendezvous in ad hoc cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2010. 1−6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683741]

[41] Jain R, Chui D, Hawe W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Technical Report, DEC-TR-301, Digital Equipment Corporation, 1984.

[42] Liu Q, Pang DM, Hu G, Wang XD, Zhou XM. A neighbor cooperation framework for time-efficient asynchronous channel hopping rendezvous in cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). 2012. 529−539. [doi: 10.1109/DYSPAN.2012.6478177]

[43] Lo BF, Akyildiz IF, Al-Dhelaan AM. Efficient recovery control channel design in cognitive radio ad hoc networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2010,59(9):4513−4526. [doi: 10.1109/TVT.2010.2073725]

[44] Chao CM, Fu HY. Providing complete rendezvous guarantee for cognitive radio networks by quorum systems and latin squares. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). 2013. 95−100. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6554545]

[45] Bian K, Park J. Maximizing rendezvous diversity in rendezvous protocols for decentralized cognitive radio networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2013,12(7):1294−1307. [doi: 10.1109/TMC.2012.103]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[46] Bian K, Park J. Asynchronous channel hopping for establishing rendezvous in cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2011. 236−240. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935056]

[47] Safdar GA, O'Neill M. Common control channel security framework for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE 69th Vehicular Technology Conf. (VTC). 2009. 1−5. [doi: 10.1109/VETECS.2009.5073450]

[48] Pelechrinis K, Iliofotou M, Krishnamurthy S. Denial of service attacks in wireless networks: The case of jammers. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2011,13(2):245−257. [doi: 10.1109/SURV.2011.041110.00022]

[49] Li XH, Cadeau W. Anti-Jamming performance of cognitive radio networks. In: Proc. of the 45th Annual Conf. on Information Sciences and Systems (CISS). 2011. 1−6. [doi: 10.1109/CISS.2011.5766199]

[50] Wilhelm M, Martinovic I, Schmitt JB, Lenders V. Reactive jamming in wireless networks: How realistic is the threat? In: Proc. of the 4th ACM Conf. on Wireless network security (WiSec). 2011. 47−52. [doi: 10.1145/1998412.1998422]

[51] Lazos L, Liu S, Krunz M. Mitigating control-channel jamming attacks in multi-channel ad hoc networks. In: Proc. of the 2nd ACM Conf. on Wireless Network Security (WiSec). 2009. 169−180. [doi: 10.1145/1514274.1514299]

[52] Tague P, Li M, Poovendran R. Probabilistic mitigation of control channel jamming via random key distribution. In: Proc. of the IEEE 18th Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2007. 1−5. [doi: 10.1109/PIMRC.2007.4394778]

[53] Strasser M, Pöpper C, Čapkun S, Čagalj M. Jamming-Resistant key establishment using uncoordinated frequency hopping. In: Proc. of the IEEE Symp. on Security and Privacy (SP). 2008. 64−78. [doi: 10.1109/SP.2008.9]

[54] Lee EK, Oh SY, Gerla M. Randomized channel hopping scheme for anti-jamming communication. In: Proc. of the Wireless Days (WD). 2010. 1−5. [doi: 10.1109/WD.2010.5657713]

[55] Su H, Wang Q, Ren K, Xing K. Jamming-Resilient dynamic spectrum access for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2011. 1−5. [doi: 10.1109/icc.2011.5962525]

[56] Wu YL, Wang BB, Liu KJR, Clancy TC. Anti-Jamming games in multi-channel cognitive radio networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012,30(1):4−15. [doi: 10.1109/JSAC.2012.120102]

[57] So JM, Vaidya N. Multi-Channel MAC for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In: Proc. of the 5th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2004. 222−233. [doi: http://doi.acm.org/10.1145/989459.989487]

[58] Brodersen RW, Wolisz A, Cabric D, Mishra SM, Willkomm D. CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum. Whitepaper. Berkeley Wireless Research Center (BWRC), 2004.

[59] Buddhikot MM, Kolodzy P, Miller S, Ryan K, Evans J. DIMSUMNet: New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp. on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). 2005. 78−85. [doi: 10.1109/WOWMOM.2005.36]

[60] Yuan Y, Bahl P, Chandra R, Chou P, Ferrell J, Moscibroda T, Narlanka S, Wu Y. KNOWS: Cognitive radio networks over whitespaces. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). 2007. 416−427. [doi: 10.1109/DYSPAN.2007.61]

[61] Brik V, Rozner E, Banerjee S, Bahl P. DSAP: A protocol for coordinated spectrum access. In: Proc. of the 1st IEEE DySPAN. 2005. 611−614. [doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542680]

[62] Zou C, Chigan C. A game theoretic DSA-driven MAC framework for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2008. 4165−4169. [doi: 10.1109/ICC.2008.782]

[63] Cabric D, Mishra SM, Brodersen RW. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In: Proc. of the 38th Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers (ACSSC). 2004. 772−776. [doi: 10.1109/ACSSC.2004.1399240]

[64] Masri A, Chiasserini CF, Perotti A. Control information exchange through UWB in cognitive radio networks. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Symp. on Wireless Pervasive Computing (ISWPC). 2010. 110−115. [doi: 10.1109/ISWPC.2010.5483805]

[65] Sahin ME, Arslan H. System design for cognitive radio communications. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom). 2006. 1−5. [doi: 10.1109/CROWNCOM.2006.363451]

[66] Masri A, Chiasserini CF, Casetti C, Perotti A. Common control channel allocation in cognitive radio networks through UWB multihop communications. In: Proc. of the 1st Nordic Workshop on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks at Levi. Finland, 2010.

[67] Chowdhury KR, Akyldiz IF. OFDM-Based common control channel design for cognitive radio ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2011,10(2):228−238. [doi: 10.1109/TMC.2010.160]

[68] Pu D, Wyglinski A, McLernon M. A frequency rendezvous approach for decentralized dynamic spectrum access networks. In: Proc. of the IEEE CrownCom. 2009. 1−6. [doi: 10.1109/CROWNCOM.2009.5189356]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[69] Pu D, Wyglinski A, McLernon M. An analysis of frequency rendezvous for decentralized dynamic spectrum access. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2010,59(4):1652−1658. [doi: 10.1109/TVT.2010.2044427]

[70] Horine B, Turgut D. Performance analysis of link rendezvous protocol for cognitive radio networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on CrownCom. 2007. 503−507. [doi: 10.1109/CROWNCOM.2007.4549850]

[71] Horine B, Turgut D. Link rendezvous protocol for cognitive radio networks. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in DySPAN. 2007. 444−447. [doi: 10.1109/DYSPAN.2007.64]

[72] Sutton PD, Nolan KE, Doyle LE. Cyclostationary signatures for rendezvous in OFDM-based dynamic spectrum access networks. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in DySPAN. 2007. 220−231. [doi: 10.1109/DYSPAN.2007.37]

[73] Sutton PD, Nolan K, Doyle L. Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(1):13−24. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080103]

[74] Luo T, Motani M, Srinivasan V. Cooperative asynchronous multichannel MAC: Design, analysis, and implementation. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2009,8(3):338−352. [doi: 10.1109/TMC.2008.109]

[75] Xin CS, Cao XJ. A cognitive radio network architecture without control channel. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2009. 1−6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5426138]

[76] Xin CS, Song M, Ma LP, Shetty S, Shen CC. Control-Free dynamic spectrum access for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2010. 1−5. [doi: 10.1109/ICC.2010.5502048]

[77] Xin CS, Song M, Ma LP, Shetty S, Shen CC. Performance analysis of a control-free dynamic spectrum access scheme. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2011,10(12):4316−4323. [doi: 10.1109/TWC.2011.101211.110364]

[78] Xin CS, Song M, Ma LP, Shen CC. An approximately optimal rendezvous scheme for dynamic spectrum access networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2011. 1−5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134275]

[79] Xin CS, Song M, Ma LP, Shen CC. ROP: Near-optimal rendezvous for dynamic spectrum access networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2013,62(7):3383−3391. [doi: 10.1109/TVT.2013.2255321]

[80] Tan K, Zhang JS, Fang J, Liu H, Ye YS. SORA: High-performance software radio using general-purpose multi-core processors. ACM Communcations, 2011,54(1):99−107. [doi: 10.1145/1866739.1866760]

[81] Tzamaloukas A, Garcia-Luna-Aceves J. Channel-Hopping multiple access. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2000. 415−419. [doi: 10.1109/ICC.2000.853348]

[82] Fu J, Ji H, Mao X. Hopping control channel MAC protocol for opportunistic spectrum access networks. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2010,17(6):65−71. [doi: 10.1016/S1005-8885(09)60527-6]

[83] Zhang YF, Li Q, Yu GX, Wang BS. ETCH: Efficient channel hopping for communication rendezvous in dynamic spectrum access networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2011. 2471−2479. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935070]

[84] Kondareddy YR, Agrawal P, Sivalingam K. Cognitive radio network setup without a common control channel. In: Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM). 2008. 1−6. [doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753398]

[85] Azar Y, Gurel-Gurevich O, Lubetzky E, Moscibroda T. Optimal discovery strategies in white space networks. In: Demetrescu C, Halldórsson MM, eds. Algorithms-ESA, Lecture Notes in Computer Science, Algorithms CESA, 2011. 713−722. [doi: 10.1007/978-3-642-23719-5_60]

[86] Romaszko S, Mähönen P. Grid-Based channel mapping in cognitive radio ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 22nd Int'l Symp. on PIMRC. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 438−444. [doi: 10.1109/PIMRC.2011.6139999]

[87] Romaszko S. Making a blind date the guaranteed rendezvous in cognitive radio ad hoc networks. In: Proc. of the 18th European Wireless Conf. on European Wireless (EW). 2012. 1−9.

[88] Romaszko S, Mahonen P. Torus quorum system and difference set-based rendezvous in cognitive radio ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 7th Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom). 2012. 202−207.

[89] Bian K, Park JM, Chen RL. Control channel establishment in cognitive radio networks using channel hopping. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(4):689−703. [doi: 10.1109/JSAC.2011.110403]

[90] DaSilva L, Guerreiro I. Sequence-Based rendezvous for dynamic spectrum access. In: Proc. of the 3rd IEEE Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). 2008. 1−7. [doi: 10.1109/DYSPAN.2008.52]

[91] Liu H, Lin ZY, Chu XW, Leung YW. Ring-Walk based channel-hopping algorithms with guaranteed rendezvous for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE/ACM Int'l Conf. on Green Computing and Communications & Int'l Conf. on Cyber, Physical and Social Computing. 2010. 755−760. [doi: 10.1109/GreenCom-CPSCom.2010.30]

[92] Lin ZY, Liu H, Chu XW, Leung YW. Enhanced jump-stay rendezvous algorithm for cognitive radio networks. IEEE Communications Letters, 2013,17(9):1742−1745. [doi: 10.1109/LCOMM.2013.071013.131029]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[93] Chuang IH, Wu HY, Lee KR, Kuo YH. Alternate hop-and-wait channel rendezvous method for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2013. 746−754. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566861]

[94] Yang D, Shin J, Kim C. Deterministic rendezvous scheme in multichannel access networks. Electronics Letters, 2010,46(20): 1402−1404. [doi: 10.1049/el.2010.1990]

[95] Shin JM, Yang DM, Kim C. A channel rendezvous scheme for cognitive radio networks. IEEE Communications Letters, 2010,14(10): 954−956. [doi: 10.1109/LCOMM.2010.091010.100904]

[96] Mišić J, Mišić VB. Probabilistic vs. sequence-based rendezvous in channel-hopping cognitive networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2013,PP(99):1−1. [doi: 10.1109/TPDS.2013.192]

[97] Zhang JM, Zhang ZY. Initial link establishment in cognitive radio networks without common control channel. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). 2011. 150−155. [doi: 10.1109/WCNC.2011.5779122]

[98] Yu L, Liu H, Leung YW, Chu XW, Lin ZY. Multiple radios for effective rendezvous in cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2013. 2857−2862. [doi: 10.1109/ICC.2013.6654974]

[99] Zhu J, Waltho A, Yang X, Guo XG. Multi-Radio coexistence: Challenges and opportunities. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN). 2007. 358−364. [doi: 10.1109/ICCCN.2007.4317845]

[100] Arsham F, Marina MK, Francisco G. Experimental investigation of coexistence interference on multi-radio 802.11 platforms. In: Proc. of the 10th Int'l Symp. on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt). 2012. 293−298. http://dblp.uni-trier.de/db/conf/wiopt/wiopt2012.html#FarshadMG12

[101] Oh YH, Thuente DJ. Sequence sensing jamming attacks against modular-based channel hopping rendezvous algorithms for cognitive ratio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2013. 2171−2176. [doi: 10.1109/ICC.2013.6654849]

[102] Oh YH, Thuente DJ. Channel detecting jamming attacks against jump-stay based channel hopping rendezvous algorithms for cognitive radio networks. In: Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN). 2013. 1−9. [doi: 10.1109/ICCCN.2013.6614113]

[103] Zhao J, Zheng H, Yang GH. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in DySPAN. 2005. 259−268. [doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542642]

[104] Chen T, Zhang H, Maggio G, Chlamtac I. CogMesh: A cluster-based cognitive radio network. In: Proc. of the 2nd IEEE DySPAN. 2007. 168−178. [doi: 10.1109/DYSPAN.2007.29]

[105] Chen T, Zhang H, Maggio G, Chlamtac I. Topology management in CogMesh: A cluster-based cognitive radio mesh network. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2007. 6516−6521. [doi: 10.1109/ICC.2007.1078]

[106] Kim MR, Yoo SJ. Distributed coordination protocol for common control channel selection in multichannel ad-hoc cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB). 2009. 227−232. [doi: 10.1109/WiMob.2009.46]

[107] Lazos L, Liu S, Krunz M. Spectrum opportunity-based control channel assignment in cognitive radio networks. In: Proc. of the 6th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). 2009. 1−9. [doi: 10.1109/SAHCN.2009.5168974]

[108] Chen T, Zhang H, Katz M, Zhou Z. Swarm intelligence based dynamic control channel assignment in CogMesh. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC) Workshops. 2008. 123−128. [doi: 10.1109/ICCW.2008.28]

[109] Bahl P, Chandra R, Dunagan J. SSCH: Slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks. In: Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom). 2004. 216−230. [doi: 10.1145/1023720.1023742]

[110] So WHS, Walrand J, Mo J. McMAC: A parallel rendezvous multi-channel MAC protocol. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). 2007. 334−339. [doi: 10.1109/WCNC.2007.67]

[111] Baldo N, Asterjadhi A, Zorzi M. Multi-Channel medium access using a virtual network coded control channel. In: Proc. of the ACM Int'l Conf. on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly (IWCMC). 2009. 1000−1005. [doi: 10.1145/1582379.1582598]

[112] Asterjadhi A, Baldo N, Zorzi M. A distributed network coded control channel for multihop cognitive radio networks. IEEE Network, 2009,23(4):26−32. [doi: 10.1109/MNET.2009.5191143]

[113] Baldo N, Asterjadhi A, Zorzi M. Dynamic spectrum access using a network coded cognitive control channel. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2010,9(8):2575−2587. [doi: 10.1109/TWC.2010.070610.091149]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[114] Doerr C, Sicker D, Grunwald D. Dynamic control channel assignment in cognitive radio networks using swarm intelligence. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2008. 1−6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.932]

[115] Doerr C, Grunwald D, Sicker D. Local independent control of cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE 3rd Int'l Conf. on CrownCom. 2008. 1−9. [doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562476]

[116] Ozger M, Akan OB. Event-Driven spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2013. 1483−1491. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566943]

[117] Song H, Lin XL. A group based MAC protocol for QoS provisioning in cognitive radio networks. In: Proc. of the 11th IEEE Singapore Int'l Conf. on Communication Systems (ICCS). 2008. 1489−1493. [doi: 10.1109/ICCS.2008.4737431]

[118] Su H, Zhang X. Cross-Layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(1):118−129. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080111]

[119] Cai LX, Liu YK, Shen XM, Mark WJ, Zhao DM. Distributed QoS-aware MAC for multimedia over cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecom. Conf. (GLOBECOM). 2010. 1−5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683743]

[120] Liu Q, Wang XD, Zhou XM. CH-CSMA/CA: A MAC protocol for asynchronous channel hopping rendezvous in 802.11 DCF based cognitive radio networks. Int'l Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems. https://www.researchgate.net/profile/Quan_Liu3/

[121] Cormio C, Chowdhury K. An adaptive multiple rendezvous control channel for cognitive radio wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Conf. on PERCOM Workshops. 2010. 346−351. [doi: 10.1109/PERCOMW.2010.5470645]

[122] Cormio C, Chowdhury KR. Common control channel design for cognitive radio wireless ad hoc networks using adaptive frequency hopping. Ad Hoc Networks, 2010,8(4):430−438. [doi: 10.1016/j.adhoc.2009.10.004]

[123] Doost-Mohammady R, Paweczak P, Janssen GJM, Segers H. Physical layer bootstrapping protocol for cognitive radio networks. In: Proc. of the 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conf. (CCNC). 2010. 1−5. [doi: 10.1109/CCNC.2010.5421578]

[124] Bahl P, Chandra R, Moscibroda T, Murty R, Welsh M. White space networking with Wi-Fi like connectivity. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. 2009. 27−38. [doi: 10.1145/1592568.1592573]

[125] Lin C, Tian Y, Yao M. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation. Chinese Journal of Computers, 2011,34(4):593−612 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.00593]

附中文参考文献:

[6] Chen KC, Prasad R,著;许方敏,李虎生,译.认知无线电网络.北京:机械工业出版社,2011.231−275.

[125] 林闯,田源,姚敏.绿色网络和绿色评价:节能机制、模型和评价.计算机学报,2011,34(4):593−612. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.00593]

刘权(1985－),男,湖南华容人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为认知无线电网络接入控制.

E-mail: liuquan@nudt.edu.cn

王晓东(1973－),男,博士,研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为无线网络,协同通信.

E-mail: xdwang@nudt.edu.cn

赵光胜(1984－),男,讲师,主要研究领域为网络与信息安全.

E-mail: zhaogs84@gmail.com

周兴铭(1938－),男,博士,教授,博士生导师,中国科学院院士,CCF 高级会员,主要研究领域为移动计算与无线网络,高性能计算,并行处理.

E-mail: xmzhou@nudt.edu.cn

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn