

认知无线网络中四维资源协作的研究现状与未来方向

谢显中, 罗莹, 严可, 陈九九

(重庆邮电大学个人通信研究所, 重庆 400065)

摘 要: 在认知无线网络 (CRN) 中, 主次用户之间可以有效地实现频谱共享 (频谱协作), 提高频谱利用率; 主次用户之间共享频谱会导致相互干扰, 从 RF 干扰信号中收集能量, 可以变害 (干扰) 为利 (绿色能源); RF 能量收集受多种因素影响随机变化而不稳定, 通过主次用户之间能量传输 (能量协作), 可以进一步改进能量的利用效率; 次用户帮助主用户协作中继传输数据 (信息协作), 这既改善了主用户传输性能, 也为自己获得了更多的传输机会。系统总结和分析认知无线网络中多维资源 (频谱、能量、干扰、中继) 的协作利用问题, 主要包括四维资源协作模型与总体研究情况, CRN 中能量收集与协作中继, CRN 中能量协作和能量收集, CRN 中同时能量协作、能量收集和协作中继及研究挑战与未来方向等, 对新一代移动通信系统具有重要意义。

关键词: 认知无线电; 频谱共享; 干扰收集; 能量协作; 信息协作

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018033

Recent advances and future challenges of four key resources cooperation in cognitive radio network

XIE Xianzhong, LUO Ying, YAN Ke, CHEN Jiujiu

Key Lab of Computer Networks and Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Cognitive radio (CR) can improve spectrum utilization by spectrum sharing or cooperation between the primary user and secondary users. It is well known that energy, interference and relay are also three key resources in cognitive radio network (CRN). Energy cooperation or sharing between the primary user and secondary user will further promote energy efficiency. Energy harvesting from RF interference signal can turn bane (interference) into a boon (green energy). Secondary user relay data of the primary user can enhance QoS of the primary user, also get some opportunities for their own transmission. Thus, four resources cooperation (spectrum, energy, interference, relay) in CRN will improve simultaneously both spectrum efficiency and energy efficiency, and also increase throughput and QoS. The overviews for collaborative utilization problems of four key resources in CRN was given. Firstly, collaboration models of four key resources were analyzed. Then, recent research advances were summarized, including three kinds of resources collaborative utilization (both energy harvesting and relay transmission, both energy cooperation and energy harvesting) and four resources collaborative utilization (simultaneous relay transmission, energy harvesting and energy cooperation) in CRN. Further, some potential challenges of four key resources cooperation in CRN were discussed. Finally, some key future research directions was concluded.

Key words: cognitive radio, spectrum sharing, interference harvesting, energy cooperation, information cooperation

收稿日期: 2017-07-31; 修回日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61271259, No.61471076, No.61601070); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目 (No.KJ1600411); 重庆市基础与前沿研究计划基金资助项目 (No.CSTC2016jcyjA0455); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (No.IRT1299); 重庆市教委重点实验室专项经费基金资助项目 (No.JK12010000062)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271259, No.61471076, No.61601070), The Science and Technology Project Affiliated to the Education Department of Chongqing (No.KJ1600411), The Basic and Frontier Research Project Affiliated to Chongqing (No.CSTC2016jcyjA0455), The Developed Program for Changjiang Scholars and Innovative Team (No.IRT1299), Key Lab's Special Fund Project Affiliated to the Education Department of Chongqing (No.JK12010000062)

1 引言

随着生活水平的不断提高, 社会经济的不断进步, 人们对移动通信容量和业务的需求不断增加。为了更好地满足日益增长的巨大需求, 移动通信系统一直在不断发展和演进, 学术界、工业界和标准化组织提出了系列高新技术, 并发展了第 1 代至第 5 代移动通信系统 (5G)。但移动通信一直面临频谱短缺、能量利用不充分、传输性能不理想等的严峻挑战, 于是, 如何同时提高频谱效率 (SE, spectrum efficiency) 和能量效率 (EE, energy efficiency) 引起高度重视。为此, 近年来充分利用无线频谱的认知无线电^[1,2] (CR, cognitive radio) 技术、充分利用能量资源的能量采集/收集^[3,4] (EH, energy harvesting) 与能量协作^[5,6] (EC, energy cooperation) 技术、改进无线传输性能的信息协作^[7,8] (IC, information cooperation) 技术等成为研究热点。

频谱和能量是无线电传输的 2 种重要资源, 频谱效率和能量效率也是无线通信的 2 个重要方面。认知无线电的提出已经十几年了, 对基于认知无线电的频谱高效利用, 即频谱共享/协作 (SS/SC, spectrum sharing / spectrum cooperation) 研究较多, 取得了很多成果, 建立了一些开发平台和测试床, 并已开始在新一代无线通信 (移动通信网、无线局域网、无线区域网等) 标准中利用^[9~20]。由于认知无线电需要频谱检测、环境感知、检测感知信息交换、参数功能重配置等附加处理, 导致更多的能量消耗, 因此, 能量效率更加重要, 但是, 如何利用认知无线电提高能量效率还没有深入研究^[21~23]。

RF 能量收集 (简称能量收集) 可以改进能量的高效利用^[24~28], 最近能量收集的灵敏度和能量转化效率也已很高。因此, 可以将能量收集与认知无线网络 (CRN, cognitive radio network) 结合, 让认知节点具有能量收集功能形成能量收集认知无线网络 (EH-CRN)^[29,30]。在 EH-CRN 中, 次用户 (认知用户) 可以从检测的主用户 (授权用户) 发送信号 (对次用户相当于干扰) 中收集能量, 主用户可以从次用户发送的信号 (对主用户相当于干扰) 中收集能量, 实现干扰收集 (IH, interference harvesting), 即从干扰信号中收集能量, 从而变害 (干扰) 为利 (收集能量), 使干扰成为一种资源。

但是, RF 能量收集受时间、空间 (位置)、无

线电频率、能量到达率及收集设备灵敏度等影响和随机变化, 在仅收集主用户信号能量时次用户性能还受主用户的活动状态 (接入与信息传输情况) 影响, 如果主次用户之间能协作进行能量传输, 实现能量协作, 也称能量共享 (ES, energy sharing), 则可以平衡主次用户的能量需求和供应, 进一步改进能量的利用效率, 达到绿色通信与组网目的。

进一步, 在认知无线网络中引入协作中继, 次用户作为中继, 帮助主用户协作传输数据, 进行信息协作, 并通过合理的功率分配, 既帮助主用户协作传输改善其传输性能, 也从中获得自己的传输机会及提供安全信息传输。另外, 协作需要更多的信号处理, 并需要更多的能量补充, 进行能量收集和能量协作更加重要。

本文总结和分析认知无线网络中的主次用户之间的干扰收集、能量协作、信息协作问题, 从而可以形成多维资源 (频谱、能量、干扰、中继) 协作利用, 将同时大幅提升频谱效率和能量效率, 并很好改进吞吐量和服务质量 (QoS, quality of service), 在移动通信中体现了“创新、协调、开放、绿色、共享”的发展理念。主要内容包括四维资源协作模型与总体研究情况, CRN 中能量收集与协作中继, CRN 中能量协作和能量收集, CRN 中同时能量协作、能量收集和协作中继, 研究挑战与未来方向等。

2 四维资源协作模型与总体研究情况

2.1 四维资源协作模型

在认知无线网络 (如蜂窝 D2D 网络^[4]、认知无线传感网络^[13]、认知专用/应急无线通信网^[19]等) 中, 主用户拥有频谱资源, 次用户与主用户共享频谱。假设主用户 (PT 和 PR)、次用户 (ST 和 SR) 都具有 RF 能量收集能力。其中, PT 表示主用户发送端, PR 表示主用户接收端, ST 表示次用户发送端, SR 表示次用户接收端。主用户为法定用户, 没有其他附加功能要求, 但可以有 2 个频点 (f_1 、 f_2) 共享; 次用户可以有 2 种附加功能, 包括 ST 有全双工或多天线波束成形。下面以 2 种典型应用场景为例, 考虑四维资源 (频谱、能量、干扰、中继) 协作利用系统的建模。

典型应用场景 1 当主用户能量充足但传输条件差、次用户能量不足时, 为了改进传输性能, 主用户向次用户传递能量 (能量协作), 而次用户帮

助主用户中继传输数据（信息协作），同时次用户也可从主用户获得频谱传输自己数据（频谱协作），进一步，能量传递和数据传输阶段次用户和主用户都可以进行 RF 能量收集。

首先，主用户只有一个频点共享，主用户以时间切换（TS, time switch）方式向次用户传递能量，如图 1 所示。该情况下四维资源协作一般需要 4 个处理阶段。阶段 1) PT 向 ST 传递能量（能量协作），PR 和 SR 都收集能量（能量收集），ST 的能量达到一个预设门限后停止能量协作。阶段 2) PT 向 PR 和 ST 传递数据，而 SR 可以继续收集能量。阶段 3) ST 帮助主用户中继传输数据给 PR（信息协作），PR 分集合并后改进传输性能。阶段 4) 主用户分享频点给次用户（频谱共享），ST 向次用户 SR 传输数据，而 PR 和 PT 都可收集能量。若 ST 有全双工功能，则 ST 同时接收 PT 的数据并向 PR 中继转发，阶段 2)和阶段 3)合并为一个阶段；若 ST 有多天线波束成形功能，则 ST 同时用不同波

束分别向 PR 和 SR 传输数据，阶段 3) 和阶段 4) 合并为一个阶段。

进一步，若 ST 收集的能量主要用于帮助主用户中继数据，则 ST 可以功率分流方式（PS, power splitting）从 PT 发来的信号中收集能量和接收数据，阶段 1)和阶段 2)合并为 1 个阶段，如图 2 所示。

另外，若主用户有 2 个频点 (f_1 、 f_2) 共享，则四维资源协作只需要 3 个处理阶段，如图 3 所示。阶段 1) PT 用频点 f_1 向次用户 ST 传递能量（能量协作），同时，ST 用主用户的频点 f_2 向 SR 传输数据（频谱共享），PR 可以收集 RF 频点 f_1 和 f_2 的能量（能量收集），而 SR 也可收集 RF 频点 f_1 的能量。阶段 2) PT 用频点 f_i (从 f_1 和 f_2 选择一个较好的频点记为 f_i) 向 PR 和 ST 传递数据，SR 可以收集频点 f_i 的能量。阶段 3) ST 用频点 f_i 帮助主用户中继传输数据给 PR（信息协作），PR 分集合并后改进传输性能，而 SR 可以继续收集能量备用。若 ST 有全双工或多天线波束成形，则上述 3 个处理阶段可以合并为 2 个阶段。

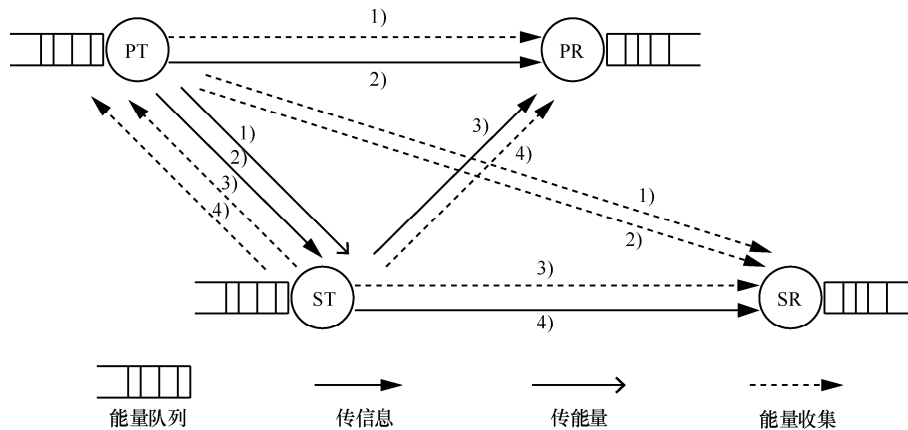


图 1 主用户向次用户传能量（一个频点，时间切换）

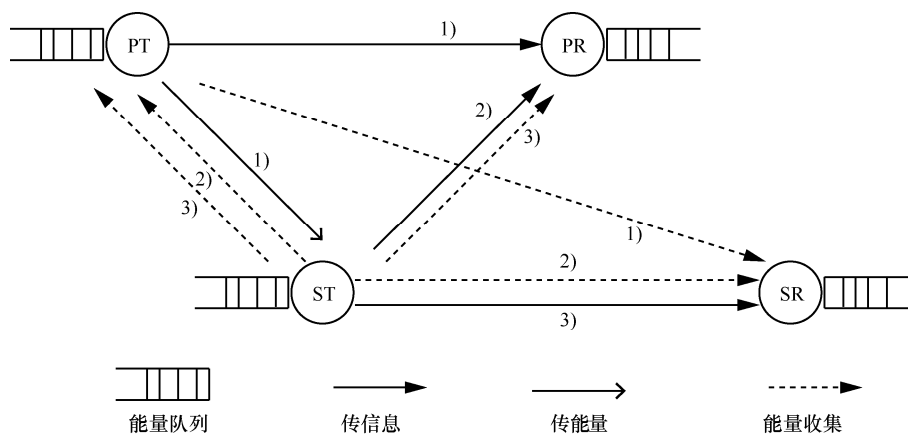


图 2 主用户向次用户传能量（一个频点，功率分流）

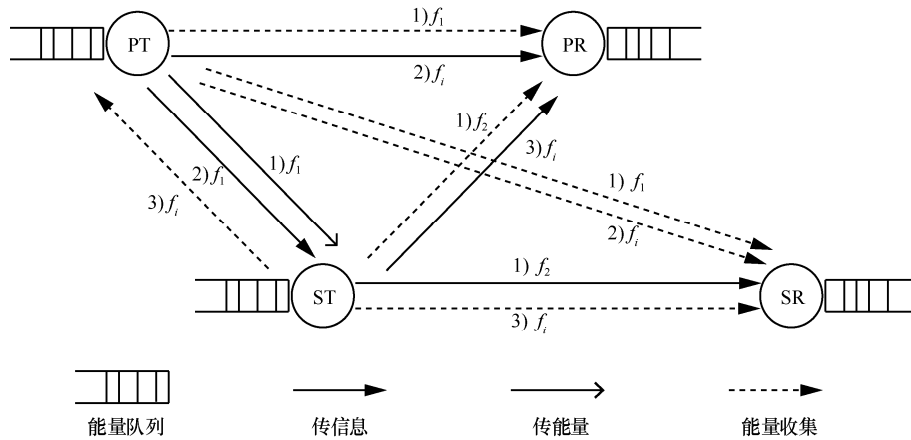


图 3 主用户向次用户传能量 (2 个频率)

典型应用场景 2 当主用户能量不足且传输条件差、次用户能量充足时,为了获得频谱传输机会,次用户向主用户传递能量(能量协作),而主用户则分配部分频谱给次用户传输数据(频谱协作),同时次用户还可帮助主用户中继传输数据(信息协作),进一步,在能量传递和数据传输阶段主用户和次用户都可以进行 RF 能量收集。

如图 4 所示,假设主用户只有 1 个频点共享(2 个频点类似),该情况下四维资源协作一般需要 4 个处理阶段。阶段 1) ST 向 PT 传递能量(能量协作),PR 和 SR 都收集能量(能量收集),PT 的能量达到一个预设门限后停止能量协作。阶段 2) 主用户分享频点给次用户(频谱共享),ST 向 SR 传输数据,而 PR 和 PT 都可收集能量。阶段 3) PT 向 PR 和 ST 传递数据,而 SR 可以继续收集能量。阶段 4) ST 帮助主用户中继传输数据给 PR(信息协作),PR 分集合并后改进传输性能,而 SR 可以继

续收集能量备用。若 ST 有全双工或多天线波束成形,则上述 4 个处理阶段可以合并为 3 个阶段。

2.2 国内外研究总体情况

本文主要涉及认知无线网络(频谱共享,SS)中干扰收集(RF 能量收集,EH)、能量共享(能量协作,EC)、信息协作(协作中继,IC)结合,为清晰呈现国内外研究现状、发展动态及存在问题,本文逐步展开认知无线网络中能量收集(包括主次用户之间协作中继和没有协作中继)、能量协作(包括进行能量收集和没有能量收集)以及能量收集、能量协作、协作中继三者结合的优势与研究情况,如表 1 所示。

3 CRN 中能量收集与协作中继

3.1 CRN 中同时能量收集和协作中继

在 CRN 中同时能量收集与协作中继研究方面(如表 1 中技术结合 1),包括主用户信号收集能量^[31,32]和其他 RF 信号收集能量^[33-36]这 2 种情况。次用户同

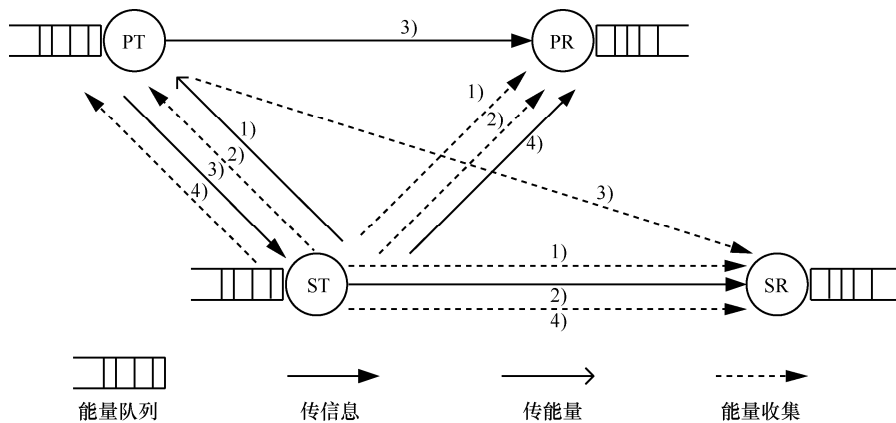


图 4 次用户向主用户传能量 (时间切换)

表 1 国内外研究现状

技术结合	优势	主要参考文献
1) 能量收集、协作中继 (EH+IC+SS)	次用户同时从主用户信号收集能量 (EH)、帮助主用户中继其信号 (IC), 并获得自己的传输机会 (SS) 和能量补偿; 同时主用户还可从次用户中继传输阶段收集能量 (EH) 三维资源协作利用: 频谱协作、干扰收集能量、中继协作传输信息	主用户信号收集能量: 文献[31,32] 其他 RF 信号收集能量: 文献[33~36]
2) 能量收集、不协作中继 (EH+SS)	开始次用户进行频谱检测, 若主用户传输信息, 则次用户从主用户信号收集能量 (EH); 若主用户空闲, 则次用户传输信息 (SS), 这时主用户也可以从次用户信号收集能量 (EH) 二维资源协作利用: 频谱协作、干扰收集能量	主用户信号收集能量: 文献[37~55] 其他 RF 信号收集能量: 文献[56~77] 2 种以上供能 (能量收集的能源和传统电网/电池的能源): 文献[78~80]
3) 能量协作、能量收集 (EC+EH+SS)	在 CR/SS 网络中, 能量收集 (EH) 受多种因素影响和随机变化, 通过主次用户之间能量传输, 实现收集能量的协作/共享 (EC), 进一步提高能量利用率 三维资源协作利用: 频谱共享协作、干扰收集能量、能量共享协作	一个频率协作/共享: 文献[81~88] 2 个频率协作/共享: 文献[89]
4) 能量收集、能量协作、协作中继 (EC+EH+IC+SS)	在能量收集 (EH) 和协作中继 (IC) 结合优势的基础上, 进行主次用户间能量协作 (EC), 进一步提高能量效率, 实现绿色通信 四维资源协作利用: 频谱共享协作、干扰收集能量、中继协作传输信息、能量共享协作	文献[90~93]

时从主用户信号收集能量和帮助主用户中继其信号, 并获得自己的传输机会和能量补偿, 同时主用户还可从次用户中继传输阶段收集能量。这时, 可以实现三维资源协作利用: 频谱协作利用、干扰收集能量、中继协作传输, 表 2 列出了具有能量收集、协作中继的文献。

文献[31]考虑单天线认知无线网络中, 次用户发送端和接收端都具有 RF 信号能量收集功能, 可以帮助主用户传输信息而没有消耗自己的能量 (从主用户信号中收集能量), 并给出了 2 个阶段能量收集和信息传输协议。1) 主用户发送信息, 次用户发送端收集能量, 次用户接收端利用功率分流, 既从主用户信号中收集能量, 也接收主用户信号 (其后用该信号消除其干扰)。2) 次用户发送端既传输自己信息, 也帮助主用户传输信息 (该信息对次用户接收端是干扰), 次用户发送端接收自己信息, 也利用保存的主用户信号消除其干扰。进一步, 得到次用户和主用户截断概率表达式, 并分析了能量和速率的折中, 但是没有考虑具体能量管理策略。

考虑主次用户之间同时进行能量收集和信息协作 (协作中继), 针对认知双向非再生中继网络, 假设次用户 ST (中继) 具有多个天线, 文献[32]给

出了次用户基于功率分流与时间交换的无线能量和信息协作方案 (2 种), 重点放在中继转发阶段的波束成形向量设计, 并就具有理想信道状态信息 (CSI, channel state information) 和非理想 CSI 情况进行了讨论, 但能量收集策略太简单, 且没有考虑具体能量管理策略。

对于从其他 RF 信号收集能量方面, 在只有单一能量供应的时分方式 (能量收集、频谱感知、信息传输在不同时间进行) 的认知无线电系统中, 文献[33]设计了次用户存储—检测—传输 3 个阶段的优化协议, 包括协作策略 (是否与主用户协作)、决策方案 (用好多时间收集能量、分配多少功率给协作中继), 建立相应优化问题, 分别得到在协作和非协作模式下次用户吞吐量的闭式解。文献[34]考虑具有能量收集能力的次用户传输机可以为次用户协作传输信息, 假设有限能量队列及无限长的自身数据队列和中继主用户数据队列, 能量队列建模为一个离散时间马尔可夫到达过程, 且收集能量仅用户主用户信息的译码和中继转发, 给出了系统的稳定吞吐量上界和下界, 并讨论了能量到达率的影响。在文献[34]基础上, 文献[35]进一步考虑了此用户时延要求, 给出了不需要信道信息的空时码协

表 2 能量收集、协作中继 (EH+IC+SS) 文献

文献	能量收集 (EH) 类型	信息协作 (IC) 方式	主要问题
文献[31~33]	主用户信号收集能量	2 个阶段能量收集和信息传输协议, 基于功率分流与时间交换的多种无线能量和信息协作方案	能量收集太简单, 没有分析具体能量管理策略, 也未考虑频谱检测错误和能量达到率等的影响
文献[34~36]	其他 RF 信号收集能量	不需要信道信息的 Alamouti 空时码协作协议, 优化次用户存储—检测—传输	需要扩展到其他正交空时码提高效率, 未考虑多分组接收能力和模型, 对于如何选择次用户协作没有涉及

作协议;进一步,文献[36]考虑了多分组接收(MPR)模型,并设计了新的协作协议。但是,由于复杂性,对于如何选择次用户协作没有涉及,也没有考虑频谱检测错误和能量达到率等的影响。

3.2 CRN 中能量收集但不协作中继

若 CRN 中能量收集时主次用户之间不协作中继(如表 1 中技术结合 2)),次用户首先进行频谱检测,若主用户传输信息,则次用户从主用户信号收集能量,主用户空闲,则次用户传输信息,这时主用户也可以从次用户信号收集能量。这时,虽然也可以实现二维资源协作利用(频谱协作利用、干扰收集能量),但频谱效率略低;进一步,由于问题简单一些,目前该方面的研究较多^[37~80],表 3 列出了具有能量收集、不协作中继的文献。

在仅主用户信号收集能量方面,文献[37]首先真正考虑认知无线网络中 RF 信号能量收集及其性能,在整体能量消耗不超过收集的能量约束下,

文献[37]通过部分可观测马尔可夫决策过程(POMDP)(次用户的 RF 能量收集和数据传输受主用户的活动状态(接入与信息传输情况)影响,因此,其能量收集和数据传输过程是一个不完全可观测随机过程)优化次用户发送端(ST)的工作模式选择(信息传输模式和能量收集模式之间切换),提高了能量收集增强 CR 传感器网络的吞吐量。在只有单一能量供应的时分方式(能量收集、频谱感知、信息传输在不同时间进行)的认知无线电系统中,文献[38]建立了相应能量收集—频谱感知—信息传输(SST)结构,通过收集时间、感知时间、传输时间之间的折中,以实现吞吐量的最大化,并利用差分进化算法求解非线性混合整数规划。在文献[39]中,次用户由能量收集方式自供能,且次用户包括能量收集(存储)—频谱检测—数据传输 3 个阶段处理,考虑 3 个处理阶段时长的折中实现最大化次用户吞吐量。

表 3 能量收集、不协作中继(EH+SS)文献

文献	优化目标	主要模型与方法	能量收集类型	能量供应方式
文献[37~39]	频谱检测—能量收集(存储)—数据传输 3 个阶段处理,最大化次用户吞吐量或系统吞吐量	部分可观测马尔可夫决策过程,折中收集时间、感知时间、传输时间	主用户信号收集能量(主用户信号外的 RF 能量收集对讨论没有大影响)	单一能量供应,节点整体能量消耗不超过收集的能量
文献[40~42]	若主用户没有信号传输,则次用户传输分组;否则,从主用户信号中收集能量;最大化次用户吞吐量	信道状态的排队模型,机器学习算法,最优信道接入策略	(同上)	(同上)
文献[43~45]	设计适合的随机接入策略(接入概率),最大化平均业务速率	多分组接收模型(MPR),分析能量到达率、传输延迟、MPR 能力对接入性能和业务速率的影响	(同上)	(同上)
文献[46~50]	在能量约束下和主用户检测约束下,最大化次用户可用吞吐量	蜂窝网络中认知 D2D 用户模型,随机几何方法,最优信道接入策略	(同上)	(同上)
文献[51~55]	在主用户 QoS 约束下,最大化收集能量	随机几何方法,优化能量收集、吞吐量、检测时间、截断概率之间的关系	(同上)	(同上)
文献[56~61]	最大化系统吞吐量,平衡能量有效性和频谱有效性	马尔可夫决策过程(MDP),设计帧结构和次用户频谱接入方案	以其他 RF 信号收集能量为主	单一能量供应,节点整体能量消耗不超过收集的能量
文献[62~68]	频谱检测—能量收集(存储)—数据传输 3 个阶段处理,最大化次用户吞吐量或系统吞吐量	过去和现在观测信息代替能量收集的预测值,非线性整数方法,优化能量到达率、能量存储率、检测概率	(同上)	(同上)
文献[69~73]	次用户传输端以时分方式处于等待模式和忙模式,保证主用户 QoS 下最大化吞吐量	隐输入马尔可夫模型,优化信道模式选择和接入策略	(同上)	(同上)
文献[74~77]	针对认知无线电传感网络,考虑能量状态变化和能量消耗概率,优化能量管理、频谱管理和资源分配	马尔可夫电池模型,基于李雅普诺夫优化将效用优化模型分解为能量管理、频谱管理和资源分配 3 个子问题	(同上)	(同上)
文献[78~80]	整体能量消耗不能超过 2 种能量总和,在截断概率约束下最大化加权和速率	随机几何模型和独立同分布的泊松点过程,优化信道分配、传输时间、传输功率	主用户信号及其他 RF 信号收集能量	2 种以上供能,包括能量收集的能源和传统电网/电池的能源

文献[40]也认为首次考虑次用户从主用户 RF 信号中收集能量时的最优信道接入策略。当主用户没有信号传输,则次用户传输分组,若有信号传输,则次用户从主用户信号中收集能量;对于一个次用户从一个主用户 RF 信号中收集能量情况,次用户基于马尔可夫决策过程,以最大化吞吐量为目标得到了次用户的优化接入策略,并利用机器学习算法克服了没有信道现在状态和模型先验参数(信道空闲概率、分组成功传输概率、成功收集 RF 能量概率等)问题。在文献[40]的基础上,为分析多个次用户从一个主用户 RF 信号中收集能量时的性能,文献[41]给出了一个包括信道状态的排队模型,并得到一个简单的次用户选择方案。在文献[41]基础上,文献[42]考虑多个次用户从多个主用户 RF 信号中收集能量时的性能,由于每个次用户不能同时检测所有主用户信道,他们之间需要协作,为最大化网络吞吐量,利用机器学习算法分别给出了具有中心控制的轮询接入和没有中心的随机计入方案。

文献[43]采用随机接入策略,假设次用户具有多分组接收能力(MPR),在保证主用户传输服务质量(QoS)的约束下最大化次用户吞吐量,并分析了能量到达率、主用户传输迟延、MPR 能力对接入性能和吞吐量的影响。在文献[43]基础上,文献[44]考虑主次用户均由能量收集方式自供能,在主次用户能量队列约束下,通过设计最优次用户检测时长最大化平均业务速率。在文献[43]的多分组接收模型基础上,文献[45]进一步考虑次用户仅有从主用户 RF 信号中收集的能量,通过选择适合的随机接入策略(接入概率)最大化次用户的吞吐量,并讨论了次用户性能和主用户活动情况之间的折中。

文献[46]考虑蜂窝网络(主网络)中认知 D2D 用户(次用户)以衬垫(Underlay)方式通信,D2D 传输机从附近的干扰(可以认为是主用户信号)中收集能量供电,当收集能量充分时通过频谱检测功能寻找空闲信道传输信息,给出了次用户随机接入和带优先级接入的策略,并利用随机几何方法分析了接入性能。文献[47]考虑主用户能量收集认知无线网络中,以最大化平均吞吐量为目标,在主用户截断概率约束下,对次用户的能量时间和传输时间的优化,得到了一种有效的在线方案。文献[48]讨论认知 OFDM 中继系统中,中继由 RF 收集能量供电,在次用户 QoS 和主用户干扰约束下,以最大化次用户吞吐量为目标,对功率分流率、OFDM 子

载波、传输功率联合优化,并通过偶分解得到了一种次优的迭代算法。文献[49]针对具有多个主用户信道的能量收集认知无线网络,次用户考虑选择哪些信道进行能量收集或传输信息,以最大化次用户吞吐量为目标,在能量约束下得到了一个优化的信道选择概率向量。在文献[49]的基础上,文献[50]进一步考虑指派哪些次用户进行协作频谱检测,在能量约束下和主用户检测约束下,以最大化次用户可用吞吐量为目标,得到优化的检测门限及检测—能量收集时间的折中。

在主用户信号收集能量的认知无线网络中,文献[51]讨论了吞吐量、能量收集、截断概率之间的关系,在主用户 QoS 约束下,通过最大化收集能量得到优化的频谱检测时间,也给出了通过最大化吞吐量下的频谱检测时间。在主用户信号收集能量的能量收集认知无线网络中,文献[52]在次用户干扰率(通信速率与干扰速率之比)和次用户检测性能(检测概率和虚警概率)的约束下,给出了通过调整频谱检测时间最大化吞吐量。当次用户在能量收集带时从主用户信号收集能量,当处在保护带外且收集能量超过预定门限时传输数据;文献[53]基于随机几何工具给出了一个可变功率传输方案,得到了次用户的传输概率表达式,并分析了次用户和主用户的截断概率和吞吐量。文献[54]继续考虑多个次用户从一个主用户 RF 信号中收集能量并共享一个主用户空闲信道时的性能,为最大化网络吞吐量(包括全部主次用户),讨论信道检测概率和接入概率的联合影响,在能量队列无限大或很小的 2 种极端情况下,给出了能量到达率、信道可用概率和竞争此用户数的关系。此外,文献[55]还给出了具有能量收集功能的认知无线电节点的功能和认知圈及 RF 收集能量供应的认知无线网络结构,并总结了当时的相关研究情况,还重点讨论了频谱检测时间和能量收集的平衡、频谱接入方式、信道选择决策等问题。

在针对从其他 RF 信号收集能量方面,也有一些文献进行了讨论。为最大化次用户吞吐量,文献[56]引入次用户能量队列,利用马尔可夫决策过程,首次对具有能量收集功能的认知无线电节点的能量收集时间和频谱感知时间进行优化,并通过检测可靠性和吞吐量的折中获得优化的能量利用。文献[57]引入能量收集认知无线网络的帧结构,定义了共享信道接入概率,讨论了传输碰撞约束下调整频谱

检测门限以最大化总的吞吐量,得到了最优的频谱检测门限、频谱能量受限界和频谱受限界。基于文献[57],文献[58]研究传输功率对能量收集认知无线网络性能的影响,进一步讨论了传输功率与平均吞吐量及能量到达率的关系,并得到优化的功率控制策略。文献[59]考虑次用户通过能量收集提供能源时的理论吞吐量,将主用户业务时域相关性建模为一个离散马尔可夫过程,考虑能量到达率、时域相关性、频谱检测门限影响,在整体能量消耗不超过收集的能量约束和碰撞约束下得到了最大吞吐量的上界。在此基础上,文献[60]设计了优化的次用户频谱接入方案,并达到文献[59]中能量收集次用户吞吐量的理论上界。文献[61]继续对文献[59]进行改进,以平均吞吐量作为目标函数,并考虑了能量收集率和次用户进行频谱检测的概率,同时增加了频谱检测概率时间相关性约束,这样可以同时取得能量有效性和频谱有效性;进一步导出了优化的能量收集率和检测门限。

文献[62]通过过去和现在的观测信息代替能量收集量的预测值,联合优化功率分配策略和频谱检测持续时间最大化次用户吞吐量,利用滑窗方法得到次优算法,并实现在线实时的能量管理。文献[63]考虑次用户传输端具有能量收集功能时,在整体能量消耗不超过收集的能量约束和碰撞约束下,通过最大化次用户平均吞吐量得到次用户传输端的检测时长和检测门限的关系。对于次用户具有能量收集功能的单用户多信道的认知无线网络,文献[64]在能量中和约束(energy neutrality constraint)下,通过选择最优信道进行检测和传输最大化次用户平均频谱效率,得到了信道选择准则,并讨论了检测错误和能量可用概率的影响。在文献[65]中,次用户由能量收集方式自供电,且次用户包括能量收集(存储)—频谱检测—传输 3 个阶段处理,考虑 3 个处理阶段时长的折中实现最大化次用户吞吐量,并讨论不精确的能量到达率影响。文献[66]考虑多时隙频谱检测问题,为了最大化次用户吞吐量,讨论了能量存储率、检测时长和检测门限之间的联合优化。在文献[66]的基础上,文献[67]进一步讨论了多时隙频谱检测时数据融合和决策融合 2 种频谱检测融合规则下,构建了非线性整数优化问题,能量存储率、检测时长和检测门限之间的联合优化及折中关系。文献[68]考虑多个中继的认知中

继信道,主用户和次用户都具有能量收集能力,认知中继采用波束成形传输信息以减少对主用户干扰,但没有考虑主次用户之间协作;给出了一种新的次用户协作协议,该协议利用多中继集的稀疏性,并可以动态选择 QoS 最好的中继。

文献[69]首次在认知无线网络中考虑次用户从主用户信号中收集能量问题。设次用户传输端以时分方式处于等待模式和忙模式。在等待模式(等待主用户传输信息结束),若产生干扰很小,则次用户以 Underlay 传输信息,若产生干扰影响主用户,则次用户不传输而从主用户信号收集能量,目标为最大化剩余能量;在忙模式(主用户空闲),次用户以 Overlay 传输信息,目标为保证主用户 QoS 下最大化吞吐量。在每个时隙开始,为了最大化长期吞吐量,次用户利用部分可观测马尔可夫决策过程确定是睡眠还是检测主用户信道,并利用能量门限确定传输信息形式,并给出了优化接入策略。在次用户和主用户都利用环境收集能量供电的认知无线网络中,文献[70]利用隐输入马尔可夫模型建模主次用户的交互,探讨了二维(2D)频谱检测方案,并能联合检测频谱和估计主用户的传输功率等级。文献[71]考虑能量收集认知无线网络中次用户传输功率优化,对信道估计和能量收集的不确定性建模,以干扰和能量约束下,以最大化吞吐量为目标,得到健壮的功率控制方法。在 RF 能量收集认知无线网络中,传统多个次用户协作频谱检测方法具有局限(没有体现 RF 能量收集的影响),文献[72]考虑对协作频谱检测进行优化,并给出了 2 种信道模式选择方法及对协作频谱检测的影响。在 RF 能量收集认知中继信道中,传统的多中继选择方法具有局限(没有体现 RF 能量收集的影响),针对干扰和距离约束下的多个 DF 中继选择,文献[73]给出了一种机会中继选择策略,并得到考虑得到次用户截断概率表达式。

在认知无线电传感网络中传感器(次用户)通过收集的能量进行感知和传输数据,为了有效进行能量管理、频谱管理和资源分配,在主用户保护和传感器数据队列稳定性约束下,文献[74]构造了一个聚集网络效用优化模型,基于李雅普诺夫(Lyapunov)优化将效用优化模型分解为能量管理子问题、频谱管理子问题和资源分配子问题,并给出了相应的低复杂度的在线算法。文献[75]继续讨论次用户具有能量收集功能的认知无线网络中

能量收集—频谱检测—数据传输 (SST) 优化问题, 为最大化能量利用率, 给出了一个三模式选择的 SST 协议, 在预定剩余能量门限下联合优化能量存储率和传输功率。在次用户 (多个) 传输机具有从主用户信号和附近专用无线供能站收集能量情况下, 次用户在收集能量和传输数据之间进行时间切换; 在主用户传输功率及次用户对主用户接收机干扰约束下, 文献[76]讨论了主用户对次用户性能的影响, 给出了系统模型, 构建了性能影响和主用户传输功率及次用户对主用户接收机干扰之间的分析表达式; 结果显示, 当次用户接近主用户传输机时, 尽管可以从主用户信号收集能量, 但主用户传输的干扰也下降次用户性能, 另外, 次用户对主用户接收机干扰约束也限制了次用户性能。目前, 能量收集认知无线网络 (EH-CRN) 理论模型中都没有考虑能量状态变化, 文献[77]中给出了马尔可夫电池模型和能量消耗概率, 并用分组丢失率优化传输策略, 讨论了能量阶段概率和频谱检测不准确的影响。

但是, 上述研究没有考虑主次用户协作, 部分文献条件和策略设置太简单, 各信道信息需要接收机反馈没有说明; 忽略次用户接收端 (SR) 的能量收集, 对具体能量管理策略和功率控制问题没有讨论, 缺乏对频谱检测错、用户业务到达率影响分析, 也没有考虑 Underlay 通信方式可以持续进行能量收集以及相应的吞吐量、迟延和能量的折中问题。

此外, 本文也注意到一些文献对次用户 2 种能源 (能量收集的能源和传统电网/电池的能源) 供应, 这时收集的能量可以存储起来, 与传统能源进行集中管理或分开管理, 整体能量消耗不能超过 2 种能量总和。在该方面, 为了不对主用户干扰, 文献[78]利用随机几何模型和独立同分布泊松点过程考虑主用户的传输保护带和能量收集带, 若 ST 在能量收集带则进行机会能量收集 (从主用户信号中收集能量), 若 ST 没有在传输保护带则进行机会传输通信; 在截断概率约束下, 通过优化次用户的传输功率和密度, 最大化次用户吞吐量, 但是, 没有结合 SR 的能量收集, ST 的能量管理太简单, ST 定向传输则不受传输保护带限制。文献[79]对协作认知无线电的研究进行了总结, 利用极化可以避免干扰思想, 次用户基站和均有正交极化天线, 且次用户终端有太阳能收集功能, 给出了基于极化和能量收集

的 2 个阶段协作构架与传输帧结构, 得到一种最大化加权和速率的低复杂度优化功率分配策略, 提高了频谱效率和能量效率, 但是, 未考虑 RF 能量收集和能量管理策略, 极化天线利用效率不高, 也可采用波束成形方式。文献[80]考虑由能量收集供电的频谱检测节点和电池供电的传感节点组成的异构认知传感网络, 频谱检测节点感知空闲信道传输传感节点的监测数据; 在能量约束下, 分别给出了最大化检测时间的频谱检测节点调度策略, 以及传感节点的传输时间、功率和信道分配方案, 但是, 未考虑主次用户协作及频谱检测节点和传感节点协作。

4 CRN 中能量协作和能量收集

CRN 中主要研究主次用户之间的信息协作, 当次用户能量受限且离主用户发送 (PT) 端较近时, 也需要考虑主次用户之间进行能量协作; 通过能量传递进行能量共享/协作可以解决能量收集的随机变化和不确定性, 进一步提高能量效率; 基于表 1 中技术结合 3), 还可以实现三维资源协作利用, 即频谱共享协作、干扰收集能量、能量共享协作。在具有能量协作的认知无线网络方面, 2014 年才得到重视并开始研究^[81], 大部分都与能量收集结合进行研究^[82-89], 其概要分类如表 4 所示。

针对一个主用户对 (PT-PR) 和一个次用户对 (ST-SR), 文献[81]首次考虑主次用户之间同时进行能量协作和信息协作, 在单向通信情况下, 假设次用户 ST (中继) 具有多个天线, 提出了次用户基于功率分流与时间交换的无线能量和信息协作方案 (2 种), 并分别给出了和速率优化与波束成形的相应算法; 结果显示, 同时能量协作和信息协作改进了性能, 而功率分流方案效果更好。但是, 没有考虑主用户或次用户收集干扰获取能量, 忽略次用户中继主用户信息需要的时间问题, 仅仅在单个时隙进行能量和信息同时协作, 也没有考虑次用户自己传输信息的优化方案。

其后, 文献[82]假设具有多个天线的对一个 ST 和 SR, 为了同时进行能量和信息协作, 考虑 2 个阶段协作, 并引入了参数调节 2 个阶段长度, 以克服文献[81]中忽略次用户中继主用户信息需要的时间问题, ST (中继) 采用基于功率分流的无线能量和信息协作方案, 并分别给出了和速率优化与波束成形的相应算法。针对主用户能量受限的情况, 文献[83]考虑

表 4 能量协作、能量收集 (EC+EH+SS) 文献

文献	能量协作方式	能量收集类型	模型与优化方法
文献[81]	一个频率协作	多个天线, 功率分流与时间交换收集能量	一个次用户对, 2 个阶段能量协作和信息协作, 和速率优化与波束成形的相应算法
文献[82~84]	—	多个天线, 功率分流收集能量	多个次用户对, 3 个阶段能量协作和信息协作, 和速率优化与波束成形相应算法, 分析次用户接入策略
文献[85,86]	—	主用户信号及其他 RF 信号收集能量	一个次用户对, 2 种能量共享方案, 在主用户吞吐量和次用户能量收集约束下最大化容量
文献[87,88]	—	主用户信号及其他 RF 信号收集能量	Underlay 认知网络, 次用户同时传递能量和信息, 优化功率传递策略和截断概率
文献[89]	2 个频率 (正交) 协作	主用户信号及其他 RF 信号收集能量	结合比例公平性, 基于总费用最小给出了同时频谱和能量协作方案

2 个阶段协作。阶段 1) 次用户可以自由地接入传输信息, 主用户从次用户信号中收集能量; 阶段 2) 主用户利用收集能量传输自己信息, 分析了主次用户的吞吐量和截断概率。文献[84]考虑多个次用户对和主用户接入策略, 分别对文献[81]和文献[83]的工作进行了扩展; 设计了 3 个阶段能量协作和信息协作协议, 侧重次用户接入方式处理, 给出 5 种接入策略并进行数字分析。但是, 仅适用于 PT 能量受限的情况, 每种接入策略的讨论太简单, 忽略了主用户接入策略, 即由收集能量到传输信息的转换接入; 另外, 未涉及如何选取阶段时长参数, 当有多个主用户对或多个次用户对时调节参数非常复杂, 还可以考虑发送广播信号供次用户检测并停止占用频谱。

由于 RF 能量收集受时间、空间 (位置)、无线电频率、能量到达率及收集设备灵敏度等影响和随机变化, 需要考虑用户之间的能量共享, 以充分发挥能量资源的效益; 在总结现有文献基础上, 文献[85]给出了 2 种能量共享方案, 包括用户之间直接能量传输的直接共享、用户之间通过业务分流进行间接能量共享, 并对其进行了比较分析。文献[86]考虑认知蜂窝网络中蜂窝基站 (主用户发送端, PT) 及蜂窝用户 (主用户接收端, PR) 和认知基站 (次用户发送端, ST) 及认知用户 (次用户接收端, SR) 之间进行同时频谱和能量协作, ST 和 PR 具有多天线, 且 PR 具有能量收集功能; ST 与 PR 进行协作, ST 采用波束成形分别向 SR 和 PR 定向传输信息, PR 采用时分模式进行能量收集 (当 ST 传输信息时) 和信息接收 (当 PT 传输信息时), 这样实现互惠互利 (ST 获得频谱传输机会, PR 收集到能量备用); 在同时保证蜂窝用户吞吐量和能量收集量约束下给出了最大化认知用户容量的优化问题, 并转化为 SDP 问题求解。但是, 仅考虑了集中控制方式的能

量共享, 且方案不具体; 另外, 没有考虑如何调节 PR 采用时分模式的时长参数, 且该参数要同时保证吞吐量和能量收集量。

在 Underlay 认知无线网络中, 由于认知用户没有主用户是否传输的信息, 为不干扰主用户, 传统做法是次用户以较低功率发送信息, 这样次用户传输质量也不太好; 文献[87]首次在 Underlay 认知无线网络中考虑能量协作, 主用户 PT 能量受限, 次用户 ST 向主用户 PT 传递能量, 从而可以较高的功率传输, 使自己的传输性能得以改善; 在单时隙工作情况给出了优化的功率传递策略, 在 2 个时隙情况给出了次优的功率分配和传递策略。针对 Underlay 认知中继网络, 中继通过次用户 ST 向其同时传递能量和信息时收集的能源供能, 文献[88]得到了次用户 ST-SR 对之间的截断概率表达式及随信干噪比 (SINR) 的变化关系, 并求得高 SINR 时的闭式解。但是, 仅针对认知中继信道, 且主次用户之间没有协作, 功率分配和传递策略太简单。

以上研究主要是针对一个频率在能量协作/共享, 文献[89]假设 2 个频率且协作的频谱是正交, 考虑认知蜂窝小区之间进行同时频谱和能量协作实现资源互补, 结合比例公平性, 基于总费用最小给出了同时频谱和能量协作方案以及相应的分布式优化算法, 为优化设计协作蜂窝系统提供了重要参考。但是, 没有给出具体的能量协作管理策略, 另外, 假设频谱和能量成本都是固定的, 实际情况下这会动态变化, 应考虑定价和博弈问题。

5 CRN 中同时能量协作、能量收集和协作中继

在 CRN 中可以同时能量协作、能量收集和信息协作 (协作中继), 在能量收集和协作中继结合优势的基础上, 进一步提高能量效率; 基于表 1 中

技术结合 4)，并实现四维资源协作利用：频谱共享协作、干扰收集能量、中继协作传输信息、能量共享协作，但总体目前研究工作不多^[90-93]，其概要分类如表 5 所示。

文献[90]针对主用户网络（一个接入点和主用户）和多个次用户网络共存情况，且主用户缺乏能量但频谱充足，次用户缺乏频谱而能量充足，考虑主次用户进行协作频谱共享；为了改进主用户的传输性能，主用户选择一个较近的次用户传递能量给他，且该次用户帮助他中继数据给接入点，而主用户则分配给部分频谱给选中的次用户传输数据；假设次用户按泊松点过程（PPP）分布在 2D 平面，主用户收集能量时间与次用户吞吐量之间存在一个折中，在主用户 QoS 约束下最大化次用户的整体吞吐量，给出了优化的带宽（主用户给次用户传输数据）分配和时间（次用户给主用户收集能量）分配算法，并利用随机几何分析了系统性能。但是，忽略了迟延问题，如何选择次用户协作、多个次用户之间是否可以协调行动（包括协调传能量和协调用频谱等）没有涉及。

为了同时提供主用户和次用户的业务速率保证，文献[91]考虑在多个时隙主次用户间进行能量和信息同时协作，给出了主用户速率优化和迭代算法。根据环境和业务的动态变化情况，文献[92]通过调整小区尺寸进行网络拓扑管理转移一个小区的业务到另一个小区，将一个小区的能量传递到另一个小区进行能量协作，进一步提高能效实现绿色通信。考虑认知蜂窝小区之间进行联合能量和业务协作，在保证 QoS 的约束下使网络能量消耗最小化，给出了优化问题求解和数值结果。在文献[92]的基础上，文献[93]研究同时能量和业务传递，有一个集中控制单元管理基站间的能量和业务协作，考虑包括用户随机到达、分组随机到达、能量环境条件随机变化等更多随机因素的影响。但是，这些工作未考虑双向能量协作，没有考虑有对环境和业务的感知功能，主用户（PT 和 PR）、次用户（ST

和 SR）都具有 RF 能量收集能力未研究；另外，集中控制单元使开销增加，同时该单元也存在较大能耗；进一步，现在方案在不同小区之间必须同时能量和业务传递，有时可能小区之间分别进行能量协作或业务协作效果更好。

6 研究挑战与未来方向

综上所述，认知无线网络中多维资源协作的还有诸多挑战，存在不少需要解决的问题，总结如下。

表 1 中技术结合 1)可实现三维资源（频谱协作、干扰收集能量、信息协作）的协作利用，研究较少^[31-36]；例如，在认知蜂窝 D2D 网络下行中，主用户（基站）频谱充足而传输条件差（小区边沿蜂窝用户），次用户（D2D 用户）位置较好而缺乏频谱的场景，为了获得频谱传输机会，次用户帮助主用户中继传输其信号（信息协作），同时获得自己的传输频谱机会（频谱协作），且主用户和次用户都可以在对方数据传输（干扰）阶段进行 RF 能量收集。

表 1 中技术结合 2)仅可实现二维资源（频谱协作、干扰收集能量）协作利用，且研究较多^[37-80]，虽然还存在一些问题，但继续研究潜力有限。

表 1 中技术结合 3)可实现三维资源（频谱协作、干扰收集能量、能量协作）的协作利用，研究也不多^[81-89]；例如，在认知无线传感网络中，主用户（传感器）频谱充足而能量不足，次用户（非授权用户）能量充足而缺乏频谱的场景，为了获得能量补充，主用户给次用户（ST）频谱传输机会（频谱协作），同时次用户（ST）向主用户传递能量（能量协作），且次用户（SR）和主用户也可分别从能量传递和数据传输阶段进行 RF 能量收集。

表 1 中技术结合 4)可实现四维资源（频谱、干扰收集能量、能量、信息）的协作利用，这方面研究^[90-93]刚开始。在认知无线网络（如蜂窝 D2D 网络、认知无线传感网络、认知专用/应急无线通信网等）中，主用户拥有频谱资源，次用户与主用户共享频谱。当主用户能量充足但传输条件差、次用

表 5 能量收集、能量协作、协作中继（EC+EH+IC+SS）文献

文献	能量收集类型	能量协作方式	模型与优化方法
文献[90]	主用户信号及其他 RF 信号收集能量	一个时隙，主次用户间进行能量和信息同时协作	次用户按泊松点过程分布在 2D 平面，随机几何方法，主用户 QoS 约束下最大化次用户的整体吞吐量
文献[91-93]	主用户信号及其他 RF 信号收集能量	多个时隙，主次用户间进行能量和信息同时协作	保证 QoS 的约束下使网络能量消耗最小化，考虑用户随机到达、分组随机到达、能量环境条件随机变化等因素的影响

户能量不足时,为了改进传输性能,主用户向次用户传递能量(能量协作),而次用户帮助主用户中继传输数据(信息协作),同时次用户也可从主用户获得频谱传输自己数据(频谱协作),进一步,能量传递和数据传输阶段次用户和主用户都可以进行 RF 能量收集。当主用户能量不足且传输条件差、次用户能量充足时,为了获得频谱传输机会,次用户向主用户传递能量(能量协作),而主用户则分配给部分频谱给次用户传输数据(频谱协作),同时次用户还可帮助主用户中继传输数据(信息协作),进一步,在能量传递和数据传输阶段主用户和次用户都可以进行 RF 能量收集。

尽管表 1 中技术结合 4)可以充分利用 4 种资源,同时提升频谱效率和能量效率,具有很好的应用前景;但是,必须构建包括不同功能节点、4 种资源、3 种协作方式、多种优化参数、各类约束条件等的系统模型,涉及异构能量和信息协作、分布式能量收集和能量管理、主次用户之间共享激励策略、协作传输机制等问题,需要考虑多维资源的联合优化和折中、共享协作的公平性和安全性、频谱接入的性能等。

因此,四维资源的协作利用(频谱协作、干扰收集能量、能量协作、信息协作)出现了许多新挑战,主要包括:不同协作方式、相互制约优化目标及多种约束参数给四维资源协作利用联合优化带来的复杂性,协作方主导地位变化导致主次用户之间频谱共享、干扰收集、中继传输、能量协作的博弈激励机制设计的挑战,协作方是否可信产生的四维资源(频谱、能量、干扰、中继)协作利用安全问题。

为了突破这些认知无线网络中四维资源协作利用的挑战,需要解决四维资源协作利用的模型和方案,四维资源协作利用的优化,四维资源协作利用的激励和管理,四维资源协作利用的安全性,为此,可能的研究方向包括基于四维资源(频谱、能量、干扰、中继)协作的模型和协作方案,四维资源(频谱、能量、干扰、中继)协作利用的联合优化算法,主次用户之间频谱共享、干扰收集、中继传输、能量协作的激励机制与能量管理算法,安全的四维资源(频谱、能量、干扰、中继)协作利用策略与算法等。这些问题的突破和解决,将具有重要应用前景,会影响未来无线通信的发展。

7 结束语

四维资源(频谱、能量、干扰、中继)的协作利用,将提升频谱效率和能量效率,并改进吞吐量和服务质量,在移动通信中体现了“创新、协调、开放、绿色、共享”的发展理念。本文总结和分析了认知无线网络中主次用户之间的干扰收集、能量协作、信息协作问题,包括四维资源协作模型与总体研究情况,CRN 中能量收集与协作中继,CRN 中能量协作和能量收集,CRN 中同时能量协作、能量收集和协作中继,研究挑战与未来方向等,这对新一代移动通信系统具有重要意义。

参考文献:

- [1] MITOLA J, GERALD Q, MAGUIRE J R. Cognitive radios: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-20.
- [3] BROWN W. Experiments in the transportation of energy by microwave beam[J]. IRE Int Convention Record, 1964, 12(2): 8-17.
- [4] KU M L, LI W, CHEN Y, et al. Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1384-1412.
- [5] GURAKAN B, OZEL O, YANG J, et al. Energy cooperation in energy harvesting wireless communications[C]//IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). 2012: 965-969.
- [6] KWAK J, SON K, YI Y, et al. Greening effect of spatiotemporal power sharing policies in cellular networks with energy constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(12): 4405-4415.
- [7] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74-80.
- [8] ZHUANG W, ISMAIL M. Cooperation in wireless communication networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(2):10-20.
- [9] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [10] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [11] DEVROYE N, VU M, TAROKH V. Cognitive radio networks[J]. IEEE Signal Process Magazine, 2008, 25(6):12-23.
- [12] MA J, LI G Y, JUANG B H. Signal processing in cognitive radio[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 805-823.
- [13] WANG J, GHOSH M, CHALLAPALI K. Emerging cognitive radio applications: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 74-81.
- [14] AZARFAR A, FRIGON J F, SANJO B. Improving the reliability of wireless networks using cognitive radios[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2): 338-354.

- [15] TRAGOS E Z, ZEADALLY S, FRAGKIADAKIS A G, et al. Spectrum assignment in cognitive radio networks: a comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1108-1135.
- [16] GAVRILOVSKA L, DENKOVSKI D, RAKOVIC V, et al. Medium access control protocols in cognitive radio networks-overview and general classification[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 2092-2124.
- [17] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, LE L B, et al. Cognitive radio techniques under practical imperfections: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 1858-1884.
- [18] CHEN Y F, OH H S. A survey of measurement-based spectrum occupancy modeling for cognitive radios[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 848-859.
- [19] 谢显中. 感知无线电技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- XIE X Z. Cognitive radio technology and application[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
- [20] 谢显中, 雷维嘉, 马彬. 认知与协作无线通信网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- XIE X Z, LEI W J, MA B. Cognitive and cooperative wireless communication networks[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011.
- [21] GÜR G, ALAGÖZ F. Green wireless communications via cognitive dimension: an overview[J]. *IEEE Network*, 2011, 25(2): 50-56.
- [22] ERYIGIT S, GUR G, BAYHAN S, et al. Energy efficiency is a subtle concept: fundamental trade-offs for cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(7): 30-36.
- [23] MILI M R, MUSAVIAN L, HAMDI K A, et al. How to increase energy efficiency in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(5): 1829-1843.
- [24] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(3): 360-381.
- [25] MISHRA D, DE S, JANA S, et al. Smart RF energy harvesting communications: challenges and opportunities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4): 70-78.
- [26] HE Y J, CHENG X D, PENG W, et al. A survey of energy harvesting communications: models and offline optimal policies[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(6): 79-85.
- [27] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 757-789.
- [28] 杨鲲, 于秦, 冷甦鹏, 等. 数能一体化无线通信网[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(5): 591-609.
- YANG K, YU Q, LENG S P, et al. Data and energy integrated communication networks[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 46(5): 591-609.
- [29] HUANG X Q, HAN T, ANSARI N. On green-energy-powered cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2015, 17(2): 827-842.
- [30] LINA M, DIANATI M, KARAGIANNIDIS G K, et al. RF-Powered cognitive radio networks: technical challenges and limitations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4): 94-100.
- [31] WANG Z, CHEN Z, LUO L, et al. Outage analysis of cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer[C]//*IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2014: 4348-4353.
- [32] LI Q Z, ZHANG Q, QIN J Y. Beamforming for information and energy cooperation in cognitive non-regenerative two-way relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5302-5313.
- [33] YIN S X, ZHANG E, QU Z W, et al. Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(9): 4693-4707.
- [34] SHAFIE A E, KHATTAB T, NAFIE M, et al. On the coexistence of a primary user with an energy harvesting secondary user: a case of cognitive cooperation[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014, 16(2): 166-176.
- [35] SHAFIE A E. Space-Time coding for an energy harvesting cooperative secondary terminal[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(9): 1571-1574.
- [36] SHAFIE A E, KHATTAB T. Maximum throughput of a cooperative energy harvesting cognitive radio user[C]//*IEEE 25th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. 2014: 1067-1072.
- [37] PARK S, HEO J, KIM B, et al. Optimal mode selection for cognitive radio sensor networks with RF energy harvesting[C]//*IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. 2012: 2155-2159.
- [38] YIN S, ZHANG E, YIN L, et al. Optimal saving-sensing-transmitting structure in self-powered cognitive radio systems with wireless energy harvesting[C]//*IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2013: 2807-2811.
- [39] YIN S, ZHANG E, YIN L, et al. Saving-sensing-throughput tradeoff in cognitive radio systems with wireless energy harvesting[C]//*IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2013: 1032-1037.
- [40] HOANG D T, NIYATO D, WANG P, et al. Opportunistic channel access and RF energy harvesting in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(11): 2039-2052.
- [41] NIYATO D, WANG P, KIM D I. Performance analysis of cognitive radio networks with opportunistic RF energy harvesting[C]//*IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2014: 1096-1101.
- [42] HOANG D T, NIYATO D, PING W, et al. Performance optimization for cooperative multiuser cognitive radio networks with RF energy harvesting capability[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3614-3629.
- [43] SHAFIE A E, SULTAN A. Optimal random access for a cognitive radio terminal with energy harvesting capability[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(6): 1128-1131.
- [44] SHAFIE A E, SULTAN A. Optimal selection of spectrum sensing duration for an energy harvesting cognitive radio[C]//*IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2013: 1020-1025.
- [45] LU Y, WANG W, ZHANG Z Y, et al. Random access for a cognitive radio transmitter with RF energy harvesting[C]//*IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2014: 923-928.
- [46] SAKR A H, HOSSAIN E. Cognitive and energy harvesting-based D2D communication in cellular networks: stochastic geometry modeling and analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(5): 1867-1880.
- [47] RAKOVIC V, DENKOVSKI D, GAVRILOVSKA L. Optimal time sharing in underlay cognitive radio systems with RF energy harvesting[C]//*IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2015: 7689-7694.
- [48] WANG X, XU W, LI S, et al. Joint power splitting and resource allocation with QoS guarantees in RF-harvesting-powered cognitive OFDM

- relay systems[C]//IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2015: 1432-1436.
- [49] PRATIBHA K, LI H, TEH K C. Channel selection in multichannel cognitive radio systems employing RF energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 457-462.
- [50] PRATIBHA K, LI K H, THE K C. Dynamic cooperative sensing-access policy for energy-harvesting cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 10137-10141.
- [51] BHOWMICK A, ROY S D, KUNDU S. Throughput of a cognitive radio network with energy-harvesting based on primary user signal[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(2): 136-139.
- [52] DENG Z, LIU X, JIA M, et al. Sensing time optimization in energy-harvesting cognitive radio with interference rate control[J]. China Communications, 2016, 13(1): 47-56.
- [53] YAO Y, YIN C, SONG X, et al. Increasing throughput in energy-based opportunistic spectrum access energy harvesting cognitive radio networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2016, 18(3): 340-350.
- [54] BAE Y H, BAEK J W. Achievable throughput analysis of opportunistic spectrum access in cognitive radio networks with energy harvesting[J]. IEEE Transactions Communications, 2016, 64(4): 1399-1410.
- [55] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Dynamic spectrum access in cognitive radio networks with RF energy harvesting[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 102-110.
- [56] SULTAN A. Sensing and transmit energy optimization for an energy harvesting cognitive radio[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(5): 500-503.
- [57] PARK S, KIM H, HONG D. Cognitive radio networks with energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1386-1397.
- [58] CHUNG W, PARK S, LIM S, et al. Optimal transmit power control for energy-harvesting cognitive radio system[C]//IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Fall). 2013: 1-5.
- [59] PARK S, HONG D. Achievable throughput of energy harvesting cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1010-1022.
- [60] PARK S, HONG D. Optimal spectrum access for energy harvesting cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(12): 6166-6179.
- [61] HAN G, ZHANG J, MU X. Joint optimization of energy harvesting and detection threshold for energy harvesting cognitive radio networks[J]. IEEE Access, 2016(4): 7212-7222.
- [62] GAO X, XU W, LI S, et al. An online energy allocation strategy for energy harvesting cognitive radio systems[C]//IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). 2013: 1-5.
- [63] CHUNG W, PARK S, LIM S, et al. Spectrum sensing optimization for energy-harvesting cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2601-2613.
- [64] JEYA P J, SANKET S K, ADRISH B. Energy harvesting cognitive radio with channel-aware sensing strategy[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1171-1174.
- [65] SHAFIE A E. Space-time coding for an energy harvesting cooperative secondary terminal[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(9): 1571-1574.
- [66] YIN S, QU Z, LI S. Optimal multi-slot spectrum sensing in energy harvesting cognitive radio systems[C]//IEEE Global Communications Conference (Globecom).2014: 793-798.
- [67] YIN S, QU Z, LI S. Achievable throughput optimization in energy harvesting cognitive radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 407-422.
- [68] SHAFIE A E, AL-DHAHIR N, HAMILA R. Sparsity-aware cooperative protocol for cognitive radio networks with energy-harvesting primary user[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3118-3131.
- [69] USMAN M, KOO I. Access strategy for hybrid underlay-overlay cognitive radios with energy harvesting[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 3164-3173.
- [70] ZHANG Y, HAN W, LI D, et al. Power versus spectrum 2-D sensing in energy harvesting cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(23): 6200-6212.
- [71] GONG S, DUAN L, WANG P. Robust optimization of cognitive radio networks powered by energy harvesting[C]//IEEE Conference on Computer Communications (ICC).2015: 612-620.
- [72] ALKHEIR A, MOUFTAH A. Cooperative spectrum sensing for RF-energy harvesting cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). 2015: 7492-7497.
- [73] LE T D, SHIN O S. Wireless energy harvesting in cognitive radio with opportunistic relays selection[C]//IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2015: 949-953.
- [74] ZHANG D, CHEN Z, ZHANG N, et al. Utility-optimal resource management and allocation algorithm for energy harvesting cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3552-3565.
- [75] WU C, SHI Q, HE C, et al. Energy utilization efficient frame structure for energy harvesting cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 488-491.
- [76] ZHANG J, NGUYEN N P, ZHANG J, et al. Impact of primary networks on the performance of energy harvesting cognitive radio networks[J]. IET Communications, 2016, 10(18): 2559-2566.
- [77] WU S, SHIN Y, KIM J Y, et al. Probability of packet loss in energy harvesting nodes with cognitive radio capabilities[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(5): 978-981.
- [78] LEE S, ZHANG R, HUANG K. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4788-4799.
- [79] ZHANG Q, CAO B, WANG Y, et al. On exploiting polarization for energy-harvesting enabled cooperative cognitive radio networking[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 21(4): 116-124.
- [80] ZHANG D, CHEN Z, REN J, et al. Energy-harvesting-aided spectrum sensing and data transmission in heterogeneous cognitive radio sensor network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 831-843.
- [81] ZHENG G, HO Z, JORSWIECK E A, et al. Information and energy cooperation in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014(62): 2290-2303.
- [82] GAO Q, JING T, XING X, et al. Simultaneous Energy and information cooperation in MIMO cooperative cognitive radio systems[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).2015: 351-356.
- [83] WANG D, REN P, WANG Y, et al. Energy cooperation for reciprocal-

ly-benefited spectrum access in cognitive radio networks[C]//IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GCSIP). 2014: 1320-1325.

- [84] SHAFIE A E, AL-DHAHIR N, HAMILA R. Cooperative access schemes for efficient SWIPT transmissions in cognitive radio networks[C]//IEEE Global Communications Conference (Globecom). 2015: 1-6.
- [85] HUANG X, ANSARI N. Energy sharing within EH-enabled wireless communication networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 23(6): 144-149.
- [86] HSIEH K Y, TSENG F S, KU M L. A spectrum and energy cooperation strategy in hierarchical cognitive radio cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 15(3): 252-255.
- [87] PATHAK K, BANERJEE A. On energy cooperation in energy harvesting underlay cognitive radio network[C]//Twenty Second National Conference on Communication (NCC). 2016: 1-6.
- [88] YANG Z, DING Z, FAN P, et al. Outage performance of cognitive relay networks with wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3828-3833.
- [89] GUO Y, XU J, DUAN L, et al. Joint energy and spectrum cooperation for cellular communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3678-3691.
- [90] ZHAI C, LIU J, ZHENG L. Cooperative spectrum sharing with wireless energy harvesting in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5303-5316.
- [91] JEYA P J, SANKET S KALAMKAR, BANERJEE A, et al. On information and energy cooperation in energy harvesting cognitive radio[C]//IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2015: 943-948.
- [92] LEE H S, BAE D H, LEE J W. Energy or traffic: which one to transfer[C]//IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). 2015: 1-5.
- [93] LEE H S, LEE J W. Energy cooperation and traffic management in cellular networks with renewable energy[C]//IEEE Global Communications Conference (Globecom).2016: 1-6.

[作者简介]



谢显中（1966-），男，四川通江人，博士，重庆邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为干扰对齐、认知无线电、协作通信技术等。



罗莹（1994-），女，重庆人，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为认知无线电、能量收集与协作技术。



严可（1995-），女，重庆人，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为认知无线电、信息与能量同传技术。



陈九九（1994-），男，湖南岳阳人，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为信息与能量同传技术、全双工无线通信系统。