

认知无线传感器网络分簇路由协议综述

王继红¹, 石文孝²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 路由协议能实现认知无线传感器网络 (CRSN, cognitive radio sensor network) 内部感知数据的有效汇聚传输, 尤其是分簇路由协议能进一步降低路由选择的复杂度、提升网络可扩展性, 对整体网络性能至关重要。因此, 针对 CRSN 分簇路由协议进行综述研究。首先, 在简要介绍 CRSN 分簇概念和优势的基础上, 阐述 CRSN 分簇算法设计考虑的主要因素。其次, 探讨 CRSN 分簇路由协议设计面临的挑战及应遵循的基本设计原则。再次, 系统的分析和总结 CRSN 分簇路由协议的研究现状。最后, 指出 CRSN 分簇路由协议研究中亟待解决的问题及未来的研究方向。

关键词: 认知无线传感器网络; 分簇; 路由协议; 信道分配; 跨层

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018244

Survey on cluster-based routing protocols for cognitive radio sensor networks

WANG Jihong¹, SHI Wenxiao²

1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract: Routing protocols could achieve efficient convergecast transmission of sensed data in cognitive radio sensor network (CRSN), and it is of vital importance for the whole network performance. In particular, cluster-based routing protocols could further lower routing selection complexity and improve scalability. Therefore, an overview of cluster-based routing protocols for CRSN was provided. Firstly, after a brief introduction to the concept and advantages of clustering in CRSN, the major factors concerning clustering algorithm design were pointed out. Secondly, the challenges faced by routing protocol design in CRSN and basic design principles were explored. Thirdly, the previous work of cluster-based routing protocols for CRSN was systematically analyzed and summarized. Finally, issues that require urgent solutions and future research directions were suggested.

Key words: cognitive radio sensor network, clustering, routing protocol, channel assignment, cross-layer

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 是由随机部署在监控区域内的大量传感器节点组成。这些节点计算和存储能力受限, 且通常由电池供电^[1]。WSN 与蓝牙、Wi-Fi、Zigbee 等通信技术共享非授权频段。研究表明这种共享方式会产生频谱资源短缺等问题, 严重影响 WSN

的性能^[2]。认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术允许节点感知主用户 (PU, primary user) 在某个特定的时间或位置处未使用的频谱部分 (即频谱空洞), 并在不干扰 PU 通信的情况下, 以机会的方式利用频谱空洞提升频谱利用率和通信性能^[3-4]。因此, 对 CR 技术与 WSN 进行智能联合, 克服日益凸显的频谱资源短缺问题, 传统 WSN 正逐步向认知无线传感器网络 (CRSN, cognitive radio

sensor network) 演进。

CRSN 是由认知无线传感器节点构成的分布式网络。这些节点感知事件信号, 在可用频带内以多跳通信方式动态、协作地向汇聚节点(sink)传递感知数据, 满足特定应用的服务质量(QoS, quality of service)要求^[5-6]。感知数据的汇聚传输需要路由协议为其选取稳定的、资源丰富的路径, 因此路由协议设计对 CRSN 整体性能至关重要。

WSN 与 CR 技术的智能联合对 CRSN 网络协议的设计, 尤其是路由协议设计, 提出了严峻的挑战。针对传统 WSN 或 CR 网络(CRN, cognitive radio network)提出的路由协议都无法直接应用于 CRSN。传统 WSN 路由协议通常以最小化网络能耗、延长网络寿命为目标, 但是没有考虑 CR 的功能与挑战; 传统 CRN 路由协议聚焦于提升动态频谱环境下的网络连通性和频谱利用率, 但是没有考虑节点的资源限制。另外有研究表明, 与平面路由协议相比, 分簇路由协议在降低路由选择复杂度、提升网络可扩展性等方面的性能更优越^[7]。因此, CRSN 分簇路由协议设计成为近年来的研究热点。CRSN 分簇路由协议设计涉及分簇算法设计、簇内簇间通信的信道选择和调度及路由协议设计 3 个方面。本文探讨 CRSN 分簇路由协议设计的相关问题, 具体贡献如下。

1) 分析 CRSN 分簇路由协议设计面临的挑战, 包括从传统的 WSN 和 CRN 继承来的挑战及 CRSN 所特有的挑战; 提出 CRSN 分簇路由协议设计应遵循的基本原则。

2) 对现有 CRSN 分簇路由协议进行详细的综述, 并从分簇算法设计考虑的因素、考虑频谱可用性变化、保护 PU、跨层设计、数据通信等方面对其进行全面比较, 分析总结各方面的优缺点。

3) 探讨 CRSN 分簇路由协议设计的开放性问题, 以期吸引科研人员探索这一极具价值的研究方向, 加速 CRSN 的实际应用。

2 CRSN 分簇相关概念及分簇算法设计考虑的因素

2.1 CRSN 分簇的基本概念

分簇是一种结构化的网络拓扑管理方法, 它通

过对邻近的相似节点进行逻辑分组和联合来实现最小化网络能耗等特定的目标^[8]。CRSN 分簇结构包括簇头(CH, cluster head)、簇成员(CM, cluster member)及网关 3 类节点, 如图 1 所示, 其中虚线圆圈表示簇的覆盖范围。

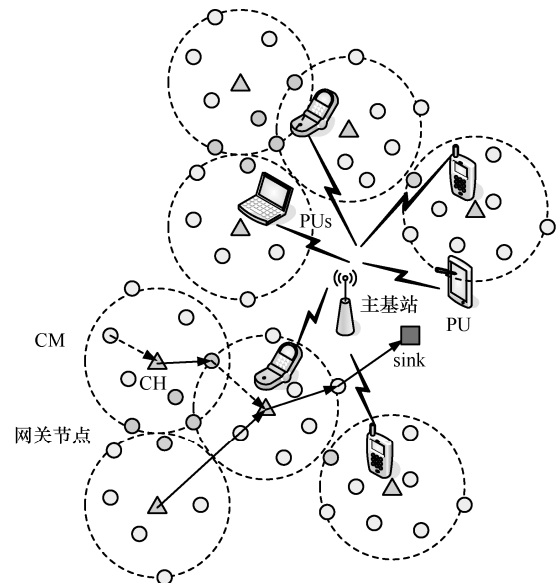


图 1 CRSN 分簇结构

传统分簇结构中, CH 是簇的领导者, 负责数据聚合、信息传输及网络管理; CM 是普通的簇节点, 负责感知事件、从周围环境中收集信息; 网关节点是相邻簇的边缘节点, 负责簇间数据中继^[9]。CRSN 中, CH 需要执行协调频谱感知、对感知结果进行融合决策及控制数据通信过程中对空闲信道的接入等额外的任务。CM 也要执行频谱感知和感知结果的汇报及检测 PU 的到达等额外的任务。网关节点仍负责相邻簇间的数据中继, 但是 CRSN 网关中继操作更为复杂。需要有效的网关节点协调机制, 因为相邻簇的网关节点可能工作在不同信道上。

2.2 CRSN 分簇的优势

分簇将网络任务分散到各个簇并在本地范围内加以解决, 为 CRSN 带来全方位性能提升。现将 CRSN 分簇的主要优势列出如下。

- 1) 提升网络的可扩展性和连通性。
- 2) 通过数据汇聚与融合减少网络业务, 降低时延和开销, 实现有效节能及负载均衡。
- 3) 降低 CRSN 节点与 PU 的同时接入相同频谱的概率, 保证 PU 接入频谱的优先权。
- 4) 提升顽健性和容错能力, 使网络能够对频谱

可用性变化、PU 到达、不可预测的节点失效等做出及时响应,方便网络拓扑管理^[10]。

2.3 CRSN 分簇算法设计考虑的主要因素

1) 最优簇数

簇数太多会导致建立的路由路径长,引入较高端到端时延;簇数太少会导致簇内通信距离大,高能耗的簇内通信会迅速耗尽 CH 能量,且节点间的频谱共享效率较差。因此,最优簇数是与分簇算法效率及频谱效率相关的重要参数^[11]。可以以最小化网络能耗、最小化与 PU 冲突等为目标来确定 CRSN 最优簇数。

2) 分簇构建机制

分簇构建机制包括:集中式/分布式分簇构建、均匀分簇/非均匀分簇构建、单跳簇/多跳簇构建及同构簇/异构簇构建等。其中,非均匀分簇指每个簇覆盖的 CM 数目不同,离 sink 越近的簇覆盖的 CM 数越少。由于分簇采用多对一的通信类型,离 sink 近的 CH 通常要执行更多的簇间分组转发,能量消耗更快,因此非均匀分簇可以有效地均衡 CH 间的能耗^[12]。

3) CH 选取

可以使用概率方法或权重计算与比较等方法来选取 CH。

4) 分簇算法的复杂度

CRSN 节点资源受限,要求低复杂度的分簇算法。分簇算法的复杂度最好保持恒定或随节点数呈线性变化^[13]。

3 CRSN 分簇路由协议设计面临的挑战及应遵循的设计原则

如前所述,针对传统的 WSN 或 CRNs 提出的分簇路由协议均无法直接应用于 CRSN^[14]。本节分析阐述 CRSN 分簇路由协议设计面临的挑战及其影响,提出 CRSN 分簇路由协议设计应遵循的基本原则,具体如图 2 所示。

1) 从 WSN 继承的路由协议设计挑战

① 节点电池能量受限。CRSN 通常使用容量受限、很难进行再充电或替换的电池为节点供电。节点电池耗尽就会停止工作,这会影响 CRSN 的正常运行甚至导致网络瘫痪。因此,要求 CRSN 路由协议设计将节能作为一个目标,在路由建立、运行、维护和重路由的过程中最小化节点能耗,延长节点及网络的寿命。

② 节点计算能力、通信能力和存储能力受限。CRSN 节点有限的处理器和内存容量制约了节点的计算和存储能力,加之能量受限,节点的通信距离通常为几十米至百米^[15]。节点与 sink 之间的通信需要其他节点的中继辅助才能完成。节点配置只能进行半双工通信的单收发信机,在某特定时刻,节点只能选择数据发送、接收和频谱感知中的一种操作。因此,要求 CRSN 路由协议设计考虑节点的单收发信机约束,尽量简化计算与信息交换,实现轻量级的多跳路由建立、运行与维护。

③ 节点之间存在干扰。通常将大量 CRSN 节

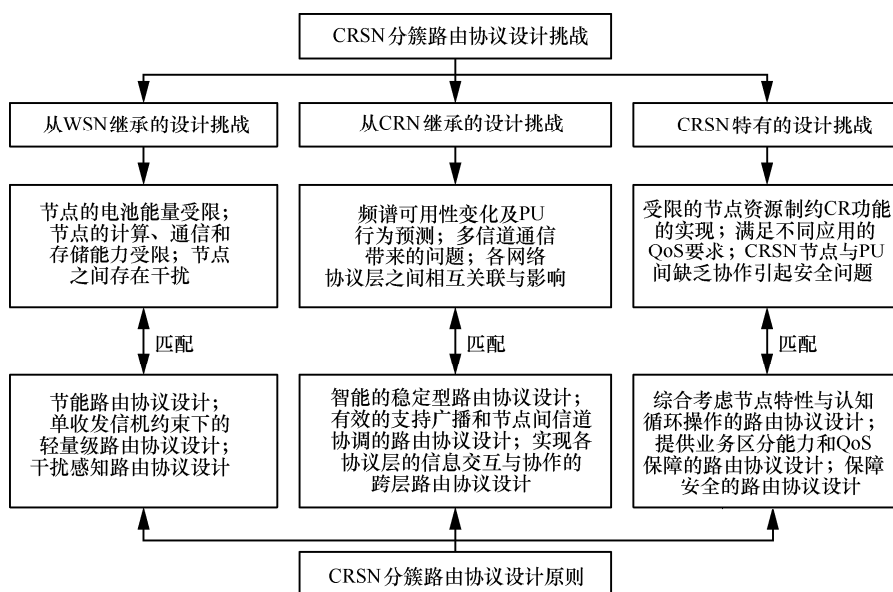


图 2 CRSN 分簇路由协议设计面临的挑战与应遵循的设计原则

点部署在有限的监控区域内进行信息感知与收集。这些节点需要竞争信道接入机会传递感知数据, 这会引起节点间的冲突与分组丢失, 导致通信可靠性下降。因此, 要求 CRSN 路由协议设计充分考虑节点间的干扰, 利用 CR 的频谱共享功能实现有效感知数据路由。

2) 从 CRN 继承的路由协议设计挑战

① 变化的频谱可用性及 PU 行为预测。PU 行为决定了特定时间、地点的频谱可用性, 制约 CRSN 节点的可用频谱列表。PU 行为的变化会引起频谱可用性在时间与空间维度的变化, 这导致 CRSN 节点转换信道甚至发起重路由。信道转换会引入时延和能量开销, 重路由会加剧网络资源消耗导致网络性能下降。因此, 要求 CRSN 路由协议设计考虑 PU 行为预测、智能地处理频谱可用性变化及信道转换代价, 保障 PU 优先接入信道的特权, 保证路由的稳定性。

② 多信道通信问题。多信道通信中, 发送节点和接收节点可能调整到不同信道上。这种情况会引发多信道隐藏终端问题和多信道“聋”问题^[16]; 为了充分利用频谱资源, 节点的收发信机需要在不同信道之间进行转换, 但是信道转换的代价是不能忽略的; 在多信道网络中支持广播通信是很有挑战性的, 因为一个节点的邻居可能调整到不同信道上。因此, 要求 CRSN 路由协议设计能支持有效的广播通信和节点间信道协调, 尽量克服多信道通信引发的相关问题。

③ 各网络协议层之间相互关联与影响。物理层的原始网络拓扑给出节点间的物理邻接关系。节点邻接关系是数据链路层的资源分配与调度、网络层路由的基础, 它决定多跳路由协议的效率。数据链路层的网络资源分配及调度决定链路带宽、传输干扰及节点间的连通关系 (即逻辑网络拓扑)。链路带宽和传输干扰是网络层路由决策经常使用的度量指标。路由又决定每条链路上的负载分布, 影响资源分配结果^[17]。由此可见, 各网络协议层之间是相互关联、相互影响的, 跨层设计将是一种必然, 而不是一种选择。因此, 要求 CRSN 路由协议设计将独立的分层协议联合形成跨层框架, 通过各协议层之间的信息交互与协作实现最优的网络性能。

3) CRSN 特有的路由协议设计挑战

① 受限的节点资源制约 CR 功能的实现。一是单收发信机配置使得 CRSN 节点不能同时感知多条

信道, 降低频谱感知效率; 且节点不能同时执行频谱感知和数据传输。二是能量受限使节点要控制频谱切换次数, 减少信道转换带来的能耗代价。三是计算能力和存储能力受限使得节点不能支持高复杂度运算, 制约频谱决策和频谱共享的优化。因此, 要求 CRSN 路由协议设计综合考虑节点特性与认知循环操作, 实现两者的平衡统一。

② 满足不同应用的 QoS 要求。CRSN 的潜在应用包括室内感知应用、多媒体应用、实时监控应用及多级异构感知应用等, 这些应用有不同的 QoS 要求。因此, 要求 CRSN 路由协议设计具备业务区分能力, 针对不同应用类型及其 QoS 要求, 提供保障应用性能的路由服务。

③ 安全性。由于 CRSN 节点与 PU 之间通常不存在协作, 自私节点或恶意节点很容易在物理层、媒体接入控制 (MAC, medium access control) 层、网络层上发动攻击, 甚至形成拒绝服务攻击。恶意节点可以通过伪造频谱感知数据或通过向信道发送大功率信号使其他 CRSN 节点感知信道为忙碌状态, 从而阻止频谱的有效利用; 自私节点或恶意节点可能会长时间占用授权信道不释放, 从而对 PU 传输造成干扰; 恶意节点可能会通过向 sink 重复发送大量数据分组, 导致周围节点迅速耗尽电池能量; 恶意节点也可能在网络层上伪造、篡改路由分组或数据分组, 导致感知数据无法正常向 sink 汇聚或导致 sink 汇聚虚假数据。因此, 要求 CRSN 路由协议利用 CRSN 节点之间的有效协作, 尽量检测和规避自私节点和恶意节点, 保证感知数据在 sink 处的正确有效的汇聚。

4 CRSN 分簇路由协议文献综述与分析

CRSN 中存在时间触发和事件驱动两种数据汇报模型。时间触发数据汇报中, CRSN 节点周期性地向 sink 传输感知数据; 事件驱动数据汇报中, 当满足关键条件或发生特定事件时, CRSN 节点向 sink 发出警示信息^[18]。根据数据汇报模型, 本文将 CRSN 分簇路由协议分为时间触发和事件驱动两大类分簇路由协议。根据协议的具体研究内容, 每大类又细分成路由已知分簇算法、分簇已知路由协议及跨层路由协议 3 个子类。现有各 CRSN 时间触发分簇路由协议的比较总结如表 1 和表 2 所示。按照上述分类方法对 CRSN 分簇路由协议研究现状进行归类总结, 得到的分类树如图 3 所示。

表 1 时间触发分簇路由协议比较——分簇算法设计考虑的因素方面

分簇路由协议	分簇触发原因		最优簇数	分簇构建机制						簇头选取				
	时间触发	事件驱动		集中式	分布式	均匀分簇	非均匀分簇	单跳簇	多跳簇	同构型簇	异构型簇	概率法	权重计算与比较	考虑因素
CogLEACH	✓		假定已知	✓	✓		✓	✓		✓		✓		空闲信道数
CogLEACH -C	✓		假定已知	✓	✓		✓	✓		✓		✓		空闲信道数、节点剩余能量
LEAUCH	✓		—	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		空闲信道数、节点剩余能量、与 sink 的距离
Fuzzy C -means	✓		假定已知	✓	✓		✓	✓		✓			✓	节点剩余能量、与 CMs 的平均距离、信道 SNR、与 sink 的距离
OTICORIC	✓		—	✓	✓		✓		✓	✓			✓	CR 频谱感知能力
DSAC	✓		推导得出	✓	✓		✓	✓		✓		✓		簇头轮转
EESA -RLC	✓		推导得出	✓	✓		✓	✓		✓			✓	空闲信道数、节点剩余能量
ABCC	✓		迭代得出	✓	✓		✓	✓		✓			✓	节点消耗能量
FOA -based CA	✓									—				
R-coefficient -based CA	✓													
CR -CEA	✓		—	✓	✓		✓	✓			✓		✓	节点位置
SCEEM (SCR)	✓		推导得出	✓	✓		✓	✓		✓			✓	空闲信道及其期望可用时间、节点剩余能量
COMUS	✓		—	✓	✓		✓	✓		✓		✓		簇头轮转
分簇地理路由协议	✓		—	✓	✓		✓	✓		✓			✓	空闲信道及其期望可用时间、节点剩余能量

注：EESA-RLC 由基站采用集中式方式从所有临时 CH 中选取 K 个最优簇头，但是具体的选取方法不明确；FOA-based CA 和 R-coefficient-based CA 研究单个簇内的信道分配问题，因此不涉及具体的分簇机制，只要求 CH 与 CM 组成异构簇；CR-CEA 假设简单的矩形网格分簇，且文中已说明这种分簇算法可以被其他任何异构 WSNs 的分簇算法取代，因此将 CR-CEA 归类为“分簇已知路由协议”。

表 2 时间触发分簇路由协议比较——其他方面

分簇路由协议	考虑频谱可用性变化	保护 PU		跨层设计	满足应用的 QoS 要求	要求全网范围内 CCC	数据通信	
		频谱感知	PU 行为预测				簇内通信	簇间通信
CogLEACH	—	假设完美感知	ON/OFF 模型	—	—	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	假设 CH 一跳接入 sink
CogLEACH-C	—	假设完美感知	ON/OFF 模型	—	—	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	假设 CH 一跳接入 sink
LEAUCH	—	假设完美感知	—	—	—	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	通过 CH 间多跳传到 sink, 但没有给出路由选取原则
Fuzzy C -means	—	考虑存在虚警和漏检概率	—	—	—	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	假设 CH 一跳接入 sink
OTICORIC	—	—	—	—	—	—	多个 CM 在不同时隙和信道上向 CH 传输	假设 CH 一跳接入 sink
DSAC	受影响节点重分簇	假设完美感知	—	—	—	√	CM 在本地公共信道上向 CH 传输	CH 以最大发送功率传给上行相邻 CH
EESA -RLC	—	考虑存在虚警和漏检概率	ON/OFF 模型	—	—	√	CM 在本地公共信道上向 CH 传输	假设 CH 一跳或最多需要一次中继即可接入 sink
ABCC	—	—	—	—	—	√	CM 在本地公共信道上向 CH 传输	假设 CH 一跳接入 sink
FOA -based CA	—	—	ON/OFF 模型	—	—	—	CM 使用不同信道向 CH 传输	—
R-coefficient -based CA	立即停止通信	假设完美感知	ON/OFF 模型	—	—	—	CH 使用 TDMA 调度不同信道上的 CM 传输	—
CR -CEA	—	假设完美感知	—	—	—	√	—	CH 间直接通信转发簇间分组
SCEEM (SCR)	—	考虑存在虚警和漏检概率	ON/OFF 模型	√	√	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	网关节点通过 CSMA/CA 转发簇间分组
COMUS	切换到备用	假设完美感知	使用时间序列模型预测	√	√	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	CH 间通过 CSMA/CA 转发簇间分组
分簇地理路由协议	—	假设完美感知	ON/OFF 模型	√	√	√	CH 在簇信道上使用 TDMA 调度 CM 传输	网关节点通过 CSMA/CA 转发簇间分组

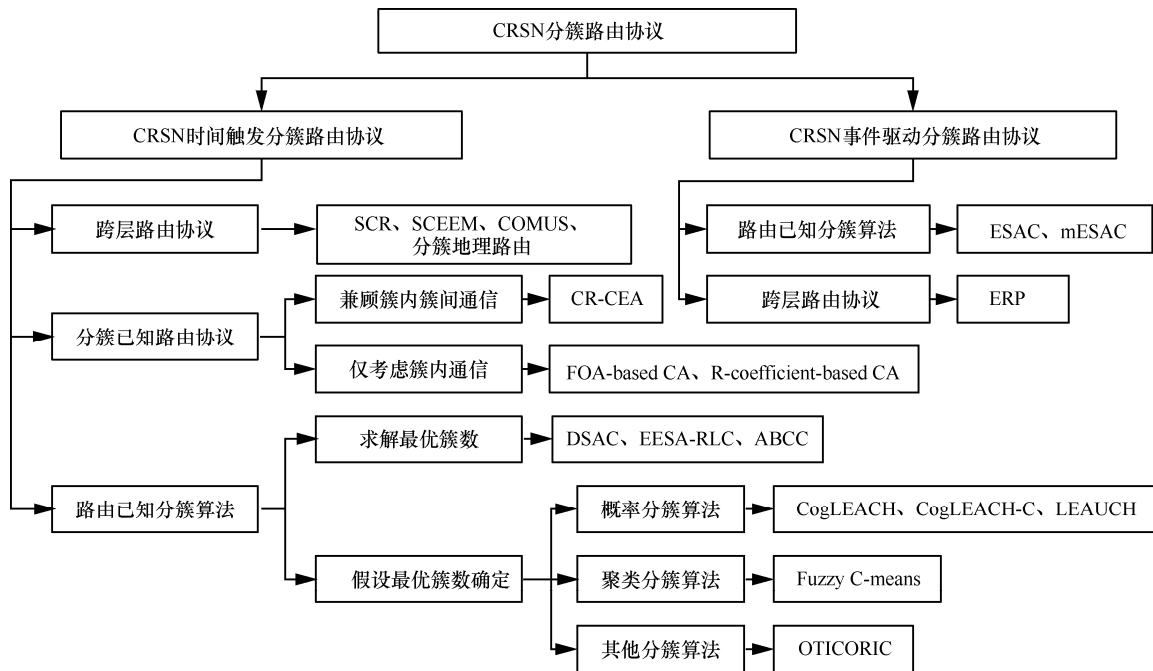


图 3 CRSN 分簇路由协议研究现状总结分类树

4.1 时间触发分簇路由协议

自网络部署之时起，时间触发分簇路由协议在网络中构建分簇，通过周期性的计算与通信来维护分簇，直至网络死亡为止。时间触发分簇路由协议适用于需要持续收集感知数据及数据通信信道可用性稳定的 CRSN 应用。

4.1.1 路由已知分簇算法

路由已知分簇算法通常规定簇内通信采用 TDMA(time division multiple access)调度，即每个 CM 在 CH 规定的时隙内向 CH 汇报感知数据，且通常显式给出或隐式表明 CH 与 sink 之间建立了直接通信。这类算法的缺陷在于确定型路由与 CRSN 的动态特性不兼容。

CogLEACH^[19] 是传统 WSN 经典分簇算法 LEACH^[20] 的分布式频谱感知扩展版本。CogLEACH 中节点使用感知到的空闲可用信道数作为 CH 概率权重，并将其与 [0,1] 之间产生的随机数进行比较，从而独立确定自己是否能成为 CH。CH 向外发出簇构建通告，接收到通告的其他节点根据接收信号强度决定加入最近的簇。成员节点把感知到的数据通过分配的 TDMA 时隙传递给对应 CH，CH 聚合数据后通过 CSMA(carrier sensing multiple access) MAC 协议将聚合数据直接传给 sink。为避免相邻簇同时使用相同信道进行簇内通信，为每个簇分配唯一的直接序列扩频码。

CogLEACH 协议每轮选取的 CH 数可能多于要求的最优簇数 K ，导致能量浪费。为解决这个问题，文献[21]提出集中式的分簇算法 CogLEACH-C。基站根据节点感知到的空闲可用信道数、剩余能量及位置从所有节点中选取 K 个最优 CH，并广播 CH 列表通告。CH 使用 TDMA 调度簇内传输，其他与 CogLEACH 协议相同。

LEAUCH 协议^[22]使用 CogLEACH 计算节点的 CH 概率权重，且规定权重大于 0.4 的节点成为候选 CH。竞争半径内剩余能量最大的候选 CH 成为最终 CH。竞争半径概念实际上引入了非均匀分簇的思想，即离 sink 越近的节点竞争半径越小。CH 向外广播簇构建通告，与 CH 有公共信道的节点加入簇。其他与 CogLEACH 协议相同。

Fuzzy C-means 算法^[23]以最小化成员节点与簇中心之间距离的平方和为目标将网络划分成 M 个簇。在各簇中，CH 的选取考虑候选节点的剩余能量、与 sink 之间的汇报信道的信噪比、与簇内其他节点间的平均路径损耗及与 sink 之间的路径损耗 4 个指标。

为避免相邻簇的通信彼此干扰，OTICORIC^[24]根据认知频谱感知能力及剩余能量构建 k 跳簇并为簇内成员分配信道。具体地，CH 为有一跳邻居在簇外的成员节点优先分配固定信道；在保证 CM 的传输需求得到满足的前提下，CH 以最小化所有

CM 传输所需的时隙数为目标向 CM 分配 (时隙, 信道) 对; 向有一跳邻居在簇外的成员节点仅分配时隙。

DSAC^[25]通过最小化网络通信能耗来求解最优簇数 K , 如式(1)所示。

$$K = \left\lfloor \frac{N}{\sqrt{3\rho d_{\max}}} + 0.5 \right\rfloor \quad (1)$$

其中, N 为网络中的节点总数, d_{\max} 为节点的最大传输范围, ρ 为网络节点密度, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。最优簇数 K 确定后, DSAC 将网络通信能耗最小化问题等同为最小化簇成员与簇中心之间距离的平方和问题, 并在组约束下进行分布式的分簇构建。共享公共信道且距离最近的节点先合并成一个簇, 然后根据可用信道信息及簇间距离不断合并最近的相邻簇, 直至达到最优簇数 K 。

EESA-RLC^[26]通过最小化网络能耗来求解最优簇数 K , 这里网络能耗包括空闲频谱感知能耗、事件感知能耗、数据处理能耗及网络通信能耗。求解出的最优簇数 K 如式(2)所示。

$$K = \sqrt{\frac{4NE_{\text{am}}S}{3(E_{\text{ss}} + E_{\text{log}} + E_{\text{cs}} + 2E_{\text{ec}} + E_{\text{th}})}} \quad (2)$$

其中, N 为网络中的节点总数, S 为网络面积, E_{am} 、 E_{ss} 、 E_{log} 、 E_{cs} 、 E_{ec} 、 E_{th} 分别为簇内通信时功率放大器每比特能耗、事件感知每比特能耗、数据记录每比特能耗、信道感知每比特能耗、电子电路每比特能耗及将数据分组传递给相邻 CH 或基站的能耗。但是, 由于 E_{th} 没有确定值, 无法直接根据上式计算最优簇数 K 。

EESA-RLC 采用集中式方式由基站根据节点的归一化剩余能量比、感知到的归一化空闲信道数及要求的 CH 比例选取 CH。EESA-RLC 将每个普通节点的最优 CH 选取问题构建为马尔可夫决策过程, 使用 Q 学习算法为节点选取最优 CH。CH 规定感知信道集合、控制 CM 对授权信道的接入及数据通信。CH 能量耗尽后, 从 CM 中选取新的 CH, 防止频繁的簇重构。

ABCC^[27]将 CRSN 分簇构建视为最小化 CRSN 中所有节点的平均通信能耗及节点剩余能量的标准差问题。使用认知驱动的人工蜂群分簇算法求解最优簇数及簇头分配。CRSN 节点与最近的 CH 连接实现感知数据的汇报传输。

现有 CRSN 路由已知分簇算法均是在传统 WSN 分簇算法基础上考虑 CR 特性的简单优化。CogLEACH、CogLEACH-C 和 LEAUCH 均为概率分簇算法。概率分簇算法的性能取决于产生的随机数, 通常无法达到良好的分簇效果。其中, LEAUCH 是目前唯一基于非均匀分簇思想的 CRSN 分簇路由协议, 然而, 体现其思想的关键参数 c 和 R_c^0 需要根据具体的应用和网络条件进行配置^[28]。这是很有挑战性的工作, 需要进行更为深入的研究。Fuzzy C-means 是聚类分簇算法, 从分簇构建角度来说, Fuzzy C-means 仍属于集中式。sink 需要收集网络中所有节点的相关信息, 这制约了网络的可扩展性且容易引发单点失效等问题。OTICORIC 建立 k 跳簇并为簇内节点通信分配 (时隙, 信道) 对。但是, 跳数 k 与网络性能之间的关系及最优 k 值选取等问题仍需进一步探讨。DSAC、EESA-RLC 及 ABCC 都求解了最优簇数 K , 区别在于目标函数不同。但是, 这 3 种协议在簇间通信能耗建模时均假设所有 CH 都能一跳或最多需要一次中继就可接入 sink。实际的大规模 CRSN 通常采用多跳簇间通信场景, 导致这些结果无法应用。另外, 在求解最优簇数时, 这 3 种协议继承传统 WSN 最优簇数求解的思路, 没有考虑 CR 带来的频谱可用性约束及具体应用的 QoS 要求。

4.1.2 分簇已知路由协议

分簇已知路由协议主要研究簇内信道分配问题, 当然也有兼顾簇内和簇间通信的路由协议。

R-coefficient-based CA^[29-30]和 FOA-based CA^[31]均是在假定分簇已经构建完成的条件下提出的簇内信道分配方案。R-coefficient-based CA 引入 R 因子用来表示节点的预测剩余能量, 以最大化所有 (节点, 信道) 对的 R 因子之和为目标来分配信道。FOA-based CA 使用果蝇优化算法执行簇内信道分配以最大化所有节点的剩余能量。

假设分簇已经构建完成, CR-CEA^[32]根据节点与 sink 间的欧氏距离、到 sink 的跳数距离及剩余能量实现分布式的逐跳路由与信道选择, 即不断选取下一跳 CH 及对应的发送信道。

R-coefficient-based CA 和 FOA-based CA 均是针对单个簇提出的 CH 集中式信道分配方案, 不涉及具体的分簇机制。实际上, CH 通常采用 TDMA 在不同时隙调度 CM, 因此应尽量为簇内所有节点分配相同信道, 减少 CH 在不同信道间频繁转换引

起的开销。CR-CEA 中, 为选择最优的下一跳 CH 及最优的发送信道, 发送端需要知道接收端的各信道上有多少个邻居在通信, 且 sink 会传回跳数更新消息, 网络交换信息量较大。

4.1.3 跨层路由协议

相比前两类路由协议的分层处理方法, 跨层路由协议综合考虑物理层分簇拓扑、数据链路层信道分配与媒体接入控制、网络层路由之间的相互作用与影响, 来优化网络性能。

SCEEM^[33](包括 SCR^[34])是为多媒体业务提出的频谱感知路由协议, 它通过最小化由丢失分组和时延引起的多媒体源失真来求解最优簇数 K 。节点根据感知到的空闲可用信道、各信道的期望可用时间及剩余能量信息计算自身的累积频谱能量排序并通过本地比较确定 CH 身份。CH 向外发出通告, 并选取簇成员间共享且期望可用时间最长的信道为簇信道。SCEEM 依靠在公共控制信道 (CCC, common control channel) 上转发 RREQ 分组以及应答 RREP 分组建立到 sink 的路由。在 RREP 分组转发的过程中, 接收到 RREP 分组的普通 CM 节点会记录相关路由信息。在数据转发过程中, 借助缓存的路由信息判断该节点离相邻簇的远近程度, 继而决定数据分组是要通过 CH 分配的 TDMA 时隙来传输, 还是直接通过转发簇中的节点中继传输。

COMUS^[35]是为多媒体业务提出的分簇路由协议, 它通过引入 PU 行为预测提升簇的稳定性。COMUS 的分簇构建过程与 DSAC 类似, 区别仅在于簇的合并规则不同。COMUS 根据簇间距离、公共信道及其累积平均可用时间计算簇间吸引力, 并选择与吸引力最大的簇合并。COMUS 的主动路由过程与 SCEEM 类似, 区别在于只有 CH 参与簇间通信。

分簇地理路由协议^[36]采用与 SCEEM 相同的方法构建分簇, 使用 TDMA 与 CSMA 融合的 MAC 协议进行簇内、簇间通信。分簇地理路由协议根据频谱感知信息选择剩余能量高于给定门限、且离 sink 更近的节点为 RREQ 包转发节

点, 通过 CCC 上 RREQ 包的逐跳转发和 sink 应答 RREP 包建立可选路由。最终源 CH 根据由通信代价和能耗不均衡度构成的路由度量选择最优路由。表 3 分析比较分簇地理路由协议与 SCEEM 的异同点。

SCEEM、COMUS 和分簇地理路由协议都是为多媒体视频业务提出的, 这制约了它们的应用范围。构建分簇时, SCEEM 中每个节点需要与邻居共享感知到的空闲可用信道、每条空闲信道的平均可用时间及节点剩余能量等信息, 信息计算和交换量大; SCEEM 路由发现过程以随机方式进行, 没有考虑 RREQ 包转发的方向性, 这些会造成 RREQ 包洪泛且源 CH 可能无法选出最优路由; SCEEM 假设只有完成当前帧的传输后节点才会释放信道, 这会对 PU 传输造成干扰。COMUS 依靠 CH 间的包转发实现簇间通信, 没有考虑由 PU 行为影响导致的相邻 CH 间可能没有公共信道的情况。分簇地理路由协议采用与 SCEEM 相同的方法构建分簇, 因此也要求交换大量信息, 浪费网络能量和带宽等资源。

4.2 事件驱动分簇路由协议

事件驱动分簇路由协议由特定事件触发, 在事件与 sink 之间的区域内构建分簇路由通道, 事件结束后分簇也随之消失。事件驱动分簇路由协议适用于事件触发数据汇报的 CRSN 应用, 有利于节省能量。

假设分簇构建过程中空闲频带不变, ESAC^[37]在事件与 sink 之间的区域内构建事件驱动分簇。ESAC 选取检测事件的节点或离 sink 更近、离事件更远的节点为构建分簇的合法节点。所有合法节点根据检测到的空闲可用信道数、合法邻居节点度及与 sink 间的欧氏距离确定自己是否能成为 CH。CH 以最大化通过 CM 和簇信道可达的两跳邻居数为目标来选取 CM、簇信道继而构建簇。CH 向其他节点发送簇构建请求, 接收请求的节点通过应答加入簇。当节点接收到多个簇构建请求时, 选择权重最大的 CH 加入。

表 3

分簇地理路由协议与 SCEEM 的异同点分析

相同点	不同点			
	RREQ 包的转发方向	对转发节点的能量要求	应答 RREP 包的节点	路由选择标准
簇构建过程相同, 簇内、簇间通信使用的 MAC 协议相同	SCEEM: 无要求 分簇地理路由协议: 向 sink 方向	SCEEM: 无要求 分簇地理路由协议: 节点剩余能量高于给定门限	SCEEM: 缓存中有到 sink 路由的节点 分簇地理路由协议: sink	SCEEM: 选择转发 RREQ 包的单条路径 分簇地理路由协议: 从转发 RREP 应答包的多条路径中选择度量值 D 最大的路径

mESAC^[38]在 ESAC 基础上进一步考虑了节点的移动性，两者的区别如表 4 所示。

ERP^[39]是事件驱动的分簇路由协议，其分簇构建过程与 ESAC 类似，他们的区别如表 5 所示。ERP 中，簇间通信是通过主、次网关节点实现的。若源 CH 的候选网关节点集合不为空，则根据候选网关节点的剩余能量、所在簇的数据信道的平均 PU 出现概率及平均空闲时间选出主网关节点，并将数据包传递给它；否则，从源簇的成员节点中根据相邻候选网关节点数量、节点剩余能量及与 sink 间的欧氏距离选取分组转发节点，通过该节点的中继将数据包传递给次网关节点。

现有的 CRSN 事件驱动分簇路由协议均是在传统 WSN 事件驱动分簇路由协议基础上考虑 CR 特性的简单优化，没有解决与 PU 信道可用性变化兼容的问题。这类协议的共同点是：分簇的临时构建会给数据传输带来一定的时延。ESAC 中每个节点要知道所有一跳、两跳邻居信息及其可用信道列表，信息交换量大。mESAC 采用 5 个指标加权的方法来选取 CH，各指标的权重确定很困难，文中没有给出确切过程。ESAC 和 mESAC 均假设预先确定的路由，这与 CRSN 的动态性不兼容。ERP 在选择包转发节点和网关节点时必须知道全网拓扑知识，这与 CRSN 的分布式特性冲突；每个节点要知道它的所有一跳邻居节点及其位置、剩余能量、空闲信道及其 PU 出现概率和平均空闲时间等信息，信息交换量大。

5 CRSN 分簇路由协议设计的开放性问题

近年来，CRSN 分簇路由协议设计问题引起了学术界和业界的广泛关注。但是，CRSN 分簇路由协议设计的研究仍处于起步阶段，协议的设计依旧沿用传统 WSN 的核心思路，没有充分考虑 CR 与 WSN 结合引发的独特性。为了更好地理解 CRSN 分簇路由协议设计这一新兴研究领域存在的开放性问题与挑战，本文将 CRSN 分簇路由协议设计尚需解决的问题列出如下。

1) 解决混合数据汇报 CRSN 的非均匀分簇问题

除了周期性的向 sink 发送感知数据外，CRSN 节点也会警示 sink 特定事件的发生。因此，融合时间触发与事件驱动数据汇报的混合数据汇报 CRSN 成为普适型 CRSN。下面讨论如何解决混合数据汇报 CRSN 的最优非均匀分簇路由协议设计问题。

混合数据汇报 CRSN 是一种特殊类型的 CRNs，因此保护 PU 接入信道的优先权、防止受到 CRSN 节点干扰是非均匀分簇路由协议设计的首要目标。这就要求最小化 CRSN 节点与 PU 之间的冲突。混合数据汇报 CRSN 也是一种特殊类型的 WSN，因此最小化全网能耗、延长网络寿命是路由协议设计的另一个目标。这就要求均衡簇内汇聚、簇间中继、频谱感知、信道转换等各种操作之间的能耗。另外，CRSN 的服务目标是提供应用所要求的差异化

表 4

ESAC 与 mESAC 的区别分析

协议	选取 CH 时考虑的因素	选取簇信道	选取最优 CH
ESACm	①节点感知到的空闲可用信道数 ②节点的合法邻居节点度 ③与 sink 间的距离	以通过 CM 和簇信道可达的两跳邻居数最多为目标选取簇信道	选择传输范围内权重最大的 CH 加入
ESAC	①节点感知到的空闲可用信道数 ②节点的合法邻居节点度③与 sink 间的距离 ④节点的剩余能量 ⑤节点的移动速度	选取与邻居间共用度最大的信道为簇信道	选择传输范围内权重最小的 CH 加入

表 5

ERP 与 ESAC 的区别分析

协议	EFC-REQ 转发	选取合法节点时考虑的因素	选取 CH 时考虑的因素	选取簇信道
ESAC	在 CCC 上转发	①距离 sink 更近 ②距离事件更远	①节点感知到的空闲可用信道数 ②节点的合法邻居节点度 ③与 sink 之间的距离	以通过 CM 和簇信道可达的两跳邻居数最多为目标选取簇信道
ERP	在检测到的所有空闲可用信道上转发	①距离 sink 更近 ②剩余能量高于给定门限	①节点感知到的空闲可用信道数 ②节点的合法邻居节点度 ③与 sink 之间的距离 ④节点的剩余能量	考虑信道的平均 PU 出现概率、平均空闲时间及信道上的邻居数

QoS, 尤其是满足事件驱动数据汇报的 QoS 要求。现有研究表明, 这 3 个目标是冲突的, 单个目标的优化会导致其他目标性能的恶化。因此, 本文提出将混合数据汇报 CRSN 非均匀分簇构建为多目标优化问题。多目标优化中最重要的是获取多目标适用度函数, 最常用的方法是使用加权和形式把多个单目标函数联合成聚合多目标函数^[40]。但是, 加权和的方法需要根据具体的应用和场景选取权重值, 这是极具挑战性的工作。因此, 本文提出利用基于约束的方法^[41]产生多目标适用度函数。该方法将其中一个单目标适用度函数作为要优化的最终目标函数, 将其余单目标适用度函数转化成约束条件。数学表达式如式(3)所示。

Optimize $O\text{-}fun_i^*$

约束条件为: $MIN_j \leq O\text{-}fun_j \leq MAX_j$ (3)

其中, $O\text{-}fun_i^*$ 是要优化的基本单目标适用度函数, MIN_j 和 MAX_j 是单目标适用度函数 $O\text{-}fun_j$ 要满足的约束条件。基于约束的方法不引入权重值, 可以使用当前流行的多目标增强学习算法或多目标演进算法进行求解, 得到非均匀分簇的最优簇数及与相对 sink 位置相关的簇大小分布。当然, 受 CRSN 节点的内存容量和计算能力制约, 要求选取计算复杂度低的优化算法。

2) 解决保护 PU 接入信道的优先权问题

保护 PU 接入信道的优先权需要解决以下两个问题。

①PU 行为预测。PU 行为对 CRSN 频谱利用有重大影响, 且很多 CR 相关参数取值都取决于 PU 行为类型。现有 CRN 文献使用各种模型来模拟 PU 行为, 如伯努利过程、马尔可夫更新过程、M/M/1、M/G/1 等^[42]。CRSN 中使用最广泛的模型是马尔可夫更新过程, 它假设 PU 行为遵循 ON/OFF 随机过程。给定信道上 PU 行为在 ON 状态和 OFF 状态之间转换, 每种状态的持续时间都是独立的随机变量, 如图 4 所示。实际上, PU 行为是动态变化且取决于位置的, 需要有效地接近实际的 PU 行为建模才能实现有效的频带利用。CRSN 节点可以利用时间序列分析法更好的理解频谱可用性, 利用机器学习等方法从过去的频谱占用历史中学习, 不断提升 PU 行为预测的准确性和频谱利用率。这方面可以借鉴 CRNs 的相关研究成果, 但是应注意能量开销问题。

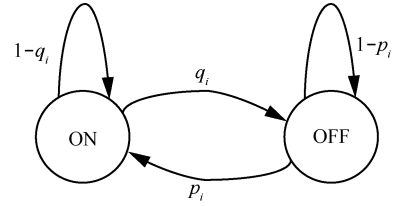


图 4 ON/OFF 状态转换示意

②频谱感知。现有文献大多假设 CRSN 节点通过频谱感知可以准确地获取空闲频谱信息, 而实际上频谱感知存在假警概率 P_f 和漏检概率 P_m ^[43]。当未感知到授权信道上的 PU 活动时, CRSN 节点可以选取该信道进行通信, 因此要求假警概率 $P_f \rightarrow 0$ 以实现高频谱利用; 当 CRSN 节点正在使用的授权信道上出现 PU 活动时, CRSN 节点应能正确检测并立即停止该信道上的通信或切换到其他可用信上去以避免与 PU 冲突, 因此要求检测概率 $P_d \rightarrow 1$, 即漏检概率 $P_m \rightarrow 0$ 。CRSN 节点的单收发机约束会导致以下情况的发生: 正在传输数据的 CRSN 节点无法发现授权信道上突然出现的 PU。CRSN 节点势必会继续进行通信直到下一个频谱感知时刻, 这会造成与 PU 传输冲突。因此, 本文提出以保障与 PU 冲突概率满足系统最低要求为目标来选取专门负责感知频谱、不执行数据汇报的簇内节点。这些邻近节点彼此协作, 当检测到授权信道上的 PU 活动时, 立即通知 CH 进行信道切换。

3) 解决保障 CRSN 多媒体业务及时延敏感业务 QoS 的路由问题

监控环境的日益复杂化要求使用音频、视频、图片等多媒体信息及时延敏感数据提升环境感知能力和环境事件描述能力。这些多媒体业务及时延敏感型业务通常在带宽、时延、吞吐量等方面有较高要求。因此, 多媒体业务及时延敏感业务需要依赖有效的路由协议选取稳定的、资源丰富的路径, 保证其 QoS 要求得到满足。

信道绑定 (CB, channel bonding) 技术具有提升带宽、最小化端到端时延、提高网络吞吐量等优势, 适合传输要求高带宽、时延非容忍的多媒体业务及时延敏感业务。CB 将连续的非重叠信道联合起来形成一条高带宽信道。完成数据传输后, 信道可以解绑并被不同用户使用^[44]。CB 是短时间内大块数据 (即数据突发) 传输问题的有效解决方案, 适用于 CRSN^[45]。目前 CRSN 的 CB 研究尚处于起步阶段, 为实现有效 CB 还需解决以下问题。

①保护频带间隔选取。为避免对相邻的 PU 或 CRSN 传输造成邻信道干扰, 绑定信道两侧要求留出保护频带。保护频带间隔的选取应保证尽量避免邻信道干扰且能充分利用带宽。本文提出根据授权信道的频谱特性, 参考无线 Mesh 网络中部分重叠信道之间重叠度的计算^[46]来确定保护频带间隔。

②合理选取绑定信道及对应的调制编码机制。应用 CB 时, 所有绑定信道选择统一的调制编码机制, 即所有绑定信道都采用相同的传输速率。现有研究表明当各信道之间的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 差异较大时, 系统吞吐量性能会受到严重影响。因此, 在保证目标误包率的条件下, 本文提出根据绑定信道块的 SINR 值及各绑定信道 SINR 值的差异, 选取合理的绑定信道及对应的调制编码机制。另外, 簇间通信通常采用 CSMA MAC 协议。为防止多速率性能异常问题的发生, 当竞争不可避免时, 应尽量使传输速率相同或相近的链路共享相同信道或绑定信道块。

③确定信道绑定规模。CB 方面的研究表明信道绑定规模不宜太大, 一般取为 2 或 3。将相同发送功率分布到加倍带宽上时, 对应的信噪比会减半, 这样会影响传输距离。另一方面, 低功率又会使节点间的干扰降低。因此, 需要进一步研究信道绑定规模与能耗、干扰之间的关系, 最终实现信道绑定规模的自适应选取。

4) 解决精细化网络能耗建模问题

网络能耗模型决定求解出的最优簇数是否准确。本文提出建立精细化的 CRSN 跨层网络能耗模型, 根据每类节点执行的具体功能计算全网能耗。例如需要分别分析 CH、普通 CM、专门负责频谱感知的节点的能耗组成及每类节点的数量。根据系统的 PU 最高冲突容忍门限确定每个簇内专门负责频谱感知的节点数量 x , 则每个簇中普通 CM 节点数量为 (簇内节点总数-1- x) 个。另外, 簇间通信用于相邻簇间的分组转发。若相邻 CH 共享相同信道, 簇间通信可以通过 CH 间的分组转发完成; 当然, 簇间通信也可以通过共享相同信道的网关节点实现。因此, 需要进一步研究簇间通信方式的选取对网络能耗的影响, 确定最终的全网能耗模型。

5) 解决要求全网范围内的专用 CCC 问题

现有的 CRSN 分簇路由协议通常假设一直在线的专用 CCC, 即存在全网范围内所有节点一直可用的 CCC 用于交换频谱相关的信息及协调传输。它

可以是 CCC 使用预留的授权频带信道, 也可以是非授权频带信道。这种假设可以极大地简化 CCC 的操作, 它能最小化 PU 行为引起的 CCC 中断^[47]。但是, 这种全网范围内的专用 CCC 存在以下问题。

①PU 行为会影响节点的可用频谱资源, 导致网络中各节点的可用信道随时间和地点变化。尤其在大规模 CRSN 中, 很难找到一条全网范围内所有节点均可用的 CCC。另外, CCC 信息的分布式收集和传输需要网络范围内重复的信息洪泛, 这会造成能量等网络资源的浪费。

②数据分组和控制消息分开在不同信道上传输, 这就要求 CRSN 节点的单收发信机在控制信道和数据信道之间频繁的转换。频繁的信道转换会引入较大时延和能量开销, 且在信道转换时间内, 节点不接收到达的任何分组。

③随着网络中 CRSN 节点数的增加, 需要交换的控制信息量增多, 可能会引起专用 CCC 饱和, 导致 CCC 上的竞争和冲突, 严重影响网络正常运行; 由于所有的控制消息都在专用 CCC 上交换, 网络很容易受到攻击, 例如 CCC 上的堵塞攻击可能会导致网络运行失败^[48]。

网络运行初期, CRSN 节点无法提前获知信道质量、PU 行为观测结果、信道可接入时间及网络负载等信息。在没有这些网络信息交换或有最少的网络信息交换条件下, CCC 的选取是一个很大的挑战。文献[49]提出了在没有全网范围内及局部 CCC 条件下基于首要信道的 CRSN 多信道广播协议。每个节点从可用信道列表中随机选取一条首要信道, 并通过相邻节点间的两次握手修正首要信道。发送节点调整到接收节点的固定首要信道上完成数据传输。实际上, 邻近的 CRSN 节点可能会共享频谱, 在簇范围内找到 CCC 的概率是极高的。因此, 需要进一步探索和研究分簇 CRSN 中最小化开销的局部 CCC 建立机制。

6 结束语

本文对现有 CRSN 分簇路由协议进行分类综述。通过综述分析得出如下结论: 1) 现有 CRSN 分簇路由协议研究主要集中在均匀分簇方面, 对非均匀分簇研究很少, 而非均匀分簇有利于实现 CH 间能耗均衡, 避免产生能量空洞; 2) 现有 CRSN 分簇路由协议研究主要聚焦在时间触发分簇路由协议, 对事件驱动分簇路由协议研究较少, 这两种

数据汇报模型可能共存于 CRSN 中, 目前尚无混合数据汇报 CRSN 分簇路由协议研究报道; 3) 现有 CRSN 分簇路由协议研究均假设使用全网范围内专用 CCC 进行控制信息交换, 但是这种假设存在很多问题。本文也探讨了 CRSN 分簇路由协议设计的开放性问题及研究趋势, 包括解决混合数据汇报 CRSN 非均匀分簇问题、保护 PU 接入信道优先权问题、多媒体业务及时延敏感业务的 QoS 路由问题、网络能耗建模问题、要求全网范围内专用 CCC 问题等。

参考文献:

- [1] ZHANG P, WANG S K, GUO K H, et al. A secure data collection scheme based on compressive sensing in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 70: 73-84.
- [2] 许驰, 郑萌, 梁炜, 等. 认知无线传感器网络的吞吐量分析[J]. *软件学报*, 2014, 25(S1): 47-55.
XU C, ZHENG M, LIANG W, et al. Throughput analysis of a cognitive radio sensor network[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(S1): 47-55.
- [3] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [4] AHMED M E, KIM D I, CHOI K W. Traffic-aware optimal spectral access in wireless powered cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(3): 733-745.
- [5] AKAN O B, KARLI O B, ERGUL O. Cognitive radio sensor networks[J]. *IEEE Network*, 2009, 23(4): 34-40.
- [6] REN J, HU J Y, ZHANG D Y, et al. RF energy harvesting and transfer in cognitive radio sensor networks: opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(1): 104-110.
- [7] LIU X X. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2012, 12(8): 11113-11153.
- [8] SUCASAS V, RADWAN A, MARQUES H, et al. A survey on clustering techniques for cooperative wireless networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 47: 53-81.
- [9] YAU K A, RAMLI N, HASHIM W, et al. Clustering algorithms for cognitive radio networks: A survey[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 45: 79-95.
- [10] JOSHI G P, KIM S W. A survey on node clustering in cognitive radio wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1-19.
- [11] AHMAD A, AHMAD S, REHMANI M H, et al. A survey on radio resource allocation in cognitive radio sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2015, 17(2): 888-917.
- [12] FAN X L, JIA H L, WANG L, et al. Energy balance based uneven cluster routing protocol using ant colony taboo for wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(1): 1305-1321.
- [13] JAN B, FARMAN H, JAVED H, et al. Energy efficient hierarchical clustering approaches in wireless sensor networks: A survey[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017: 1-14.
- [14] ZHANG L C, CAI Z P, LI P, et al. Spectrum-availability based routing for cognitive sensor networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 4448-4457.
- [15] SHEN H, BAI G W. Routing in wireless multimedia sensor networks: A survey and challenges ahead[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 71: 30-49.
- [16] SOUA R, MINET P. Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: a comprehensive survey[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 16(PA): 2-21.
- [17] REHAN W, FISCHER S, REHAN M, et al. A comprehensive survey on multichannel routing in wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 95: 1-25.
- [18] FONOAGE M, CARDEI M, AMBROSE A. A QoS based routing protocol for wireless sensor networks[C]// *IEEE 29th International Performance, Computing and Communications Conference*. 2010: 122-129.
- [19] ELETREBY R M, ELSAYED H M, KHAIRY M M. CogLEACH: a spectrum aware clustering protocol for cognitive radio sensor networks[C]// *9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. 2014: 179-184.
- [20] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [21] AKREM L A, QIU D Y. Energy efficient spectrum aware clustering for cognitive sensor networks: CogLEACH-C[C]// *10th International Conference on Communications and Networking in China*. 2015: 515-520.
- [22] PEI E R, HAN H Z, SUN Z H, et al. LEAUCH: low-energy adaptive uneven clustering hierarchy for cognitive radio sensor network[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015, 2015(1): 1-8.
- [23] BHATTI D M S, SAEED N, NAM H. Fuzzy c-means clustering and energy efficient cluster head selection for cooperative sensor network[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1-17.
- [24] MABROUK O, MINET P, IDOUDI H, et al. Intra-cluster multichannel scheduling algorithm for cognitive radio sensor networks[C]// *11th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. 2015: 1452-1457.
- [25] ZHANG H Z, ZHANG Z Y, DAI H Y, et al. Distributed spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks[C]// *2011 IEEE Global Telecommunications Conference*. 2011: 1-6.
- [26] MUSTAPHA I, ALI B M, RASID M F, et al. An energy-efficient spectrum-aware reinforcement learning-based clustering algorithm for cognitive radio sensor networks[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 19783-19818.
- [27] KIM S, MCLOONE S, BYEON J, et al. Cognitively inspired artificial bee colony clustering for cognitive wireless sensor networks[J]. *Cognitive Computing*, 2017, 9(2): 207-224.
- [28] LI C F, YE M, CHEN G H, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks[C]// *2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*. 2005: 597-604.
- [29] LI X Y, WANG D X, MCNAIR J, et al. Residual energy aware channel assignment in cognitive radio sensor networks[C]// *2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2011: 398-403.
- [30] LI X Y, WANG D X, MCNAIR J, et al. Dynamic spectrum access with packet size adaptation and residual energy balancing for energy-constrained cognitive radio sensor networks[J]. *Journal of Network*

- and Computer Applications, 2014, 41(1): 157-166.
- [31] HUANG X M, DU J Y, KUANG S J. A channel assignment algorithm of CRSN based on FOA[C]//12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. 2016: 680-685.
- [32] TIZVAR R, ABBASPOUR M, DEHGHANI M. CR-CEA: a collision-and energy-aware routing method for cognitive radio wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2014, 20(7): 2037-2052.
- [33] SHAH G A, ALAGOZ F, FADEL E A, et al. A spectrum-aware clustering for efficient multimedia routing in cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3369-3380.
- [34] SHAH G A, AKAN O B. Spectrum-aware cluster-based routing for cognitive radio sensor networks[C]// IEEE International Conference on Communications. 2013: 2885-2889.
- [35] BRADAI A, SINGH K, RACHEDI A, et al. EMCOS: energy-efficient mechanism for multimedia streaming over cognitive radio sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2015, 22: 16-32.
- [36] ABBASI S, MIRJALILI G. A cluster-based geographical routing protocol for multimedia cognitive radio sensor networks[C]//IEEE 7th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. 2017: 91-94.
- [37] OZGER M, AKAN O B. Event-driven spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks[C]// IEEE INFOCOM 2013. 2013: 1483-1491.
- [38] OZGER M, FADEL E, AKAN O B. Event-to-sink spectrum-aware clustering in mobile cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(9): 2221-2233.
- [39] TABASSUM M, RAZZAQUE M A, MIAZI M N S, et al. An energy aware event-driven routing protocol for cognitive radio sensor networks[J]. Wireless Networks, 2016, 22(5): 1523-1536.
- [40] SALEM T M, ABDEL-MAGEID S, ABD EL-KADER S M, et al. A quality of service distributed optimizer for cognitive radio sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2015, 22: 71-89.
- [41] YOUSSEF M, IBRAHIM M, ABDELATIF M, et al. Routing metrics of cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(1): 92-109.
- [42] BUKHARI S H R, REHMANI M H, SIRAJ S. A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(2): 924-948.
- [43] LEE D J, JANG M S. Optimal spectrum sensing time considering spectrum handoff due to false alarm in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(12): 899-901.
- [44] KHAN Z, AHMADI H, HOSSAIN E, et al. Carrier aggregation/channel bonding in next generation cellular networks: methods and challenges[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 34-40.
- [45] BUKHARI S H R, SIRAJ S, REHMANI M H. PRACB: a novel channel bonding algorithm for cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Access, 2016, 4: 6950-6963.
- [46] WANG J H, SHI W X. On channel assignment for multicast in multi-radio multi-channel wireless mesh networks: a survey[J]. China Communications, 2015, 12(1): 122-135.
- [47] AKYILDIZ I F, LEE W Y, CHOWDHURY K R. CRAHNS: cognitive radio ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 810-836.
- [48] WU Y S, CARDEI M. Multi-channel and cognitive radio approaches for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2016, 94: 30-45.
- [49] 普健杰, 曾凡仔. 基于首要信道的无线认知传感器网络多信道广播协议[J]. 通信学报, 2013, 34(7): 81-86.
- PU J J, ZENG F Z. Multi-channel broadcast protocol for CRSN based on home channel[J]. Journal on Communications, 2013, 34(7): 81-86.

[作者简介]



王继红 (1986—), 女, 辽宁营口人, 博士, 东北电力大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为认知无线传感器网络、无线网络路由与资源分配等。



石文孝 (1960—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线资源管理技术、mesh 网络技术和无线光通信。