

# 无线认知传感器网络的研究

王永华 杨健 程良伦 万频 张伯威  
(广东工业大学自动化学院 广州 510006)

**摘要** 在无线传感器网络中引入认知无线电技术,构成无线认知传感器网络,可以减少 ISM 频段干扰,提高数据传输率。对无线认知传感器网络的研究目前已成为一个新的研究领域。介绍了无线认知传感器网络的概念,从无线认知传感器网络的节点、频谱感知、频谱决策、频谱共享、频谱迁移、网络层、传输层、应用层等方面综述了现有的研究成果,讨论了目前存在的问题和需要进一步研究的方向。

**关键词** 无线传感器网络,认知无线电,无线认知传感器网络

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Survey on Wireless Cognitive Radio Sensor Networks

WANG Yong-hua YANG Jian CHENG Liang-lun WAN Pin ZHANG Bo-wei  
(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** Incorporating Cognitive Radio technology in Wireless Sensor Networks yields the Cognitive Radio Sensor Networks, which can reduce the interference of ISM band interference and improve data transfer rates. Cognitive Radio Sensor Networks have become a new hot research area. The concept of Cognitive Radio Sensor Networks was described. The research work on spectrum management functionalities such spectrum sensing, spectrum sharing, spectrum decision, spectrum mobility, and the network layer protocols, transport layer protocols, application layer protocols were introduced. The existing problems in the current researchwork and the new research issues were also discussed.

**Keywords** Wireless sensor network, Cognitive radio, Cognitive radio sensor network

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的研究近年来引起了世界各国军事部门、学术界和工业界的广泛关注,国内外的许多大学和研究机构都投入了大量的研发力量从事这项工作。无线传感器网络是一种由大量集信息采集、处理和无线传输于一体的微型传感器节点组成的无线自组织网络<sup>[1]</sup>。近年来,随着传感器、微电子、通信和计算技术的发展,无线传感器网络越来越广泛地应用于国防军事、环境监测、医疗卫生、工业自动化等众多领域<sup>[1,2]</sup>。

现有的无线传感器网络都工作在无需授权的 ISM 频段(如 2.4GHz 频段),这些公用频段正随着各种新无线通信技术的兴起(如 Wifi、蓝牙、Wimax、Zigbee 等)而变得日益拥挤,ISM 频段的各种无线技术之间的干扰日趋严重。例如有研究表明在同时工作时,IEEE802.11 网络会明显降低 Zigbee/802.15.4 网络的性能<sup>[3]</sup>,公用频段的异构无线系统共存问题已成为无线传感器网络继续发展的瓶颈<sup>[3]</sup>。为了解决传感器网络频谱资源有限的问题,可以在传感器网络中引入认知无线电技术,以建立适合的频谱使用模型,实现有序竞争访问和高效共享的动态频谱分配机制。

认知无线电技术<sup>[4]</sup>是 Joseph Mitola 博士提出的一种智能频谱共享技术,使无线通信设备具有发现“频谱空穴”并合

理利用的能力,来解决有限的频谱资源和固定的频谱分配导致的低效使用率之间的矛盾。其核心的思想就是无线通信设备能够动态感知周围环境中频谱资源的使用情况,动态接入空闲频谱,同时不对其他设备(授权用户)的正常工作产生干扰。

在无线传感器网络中采用认知无线电技术,使传感器网络节点可以实时感知周围环境中的频谱信息,获取可用频谱资源,在通信过程中能够动态选择未被占用的频谱资源来完成通信过程。这样,不仅能缓解公用频段的拥挤状况,并且可提高网络对空闲频谱的利用率,增加节点可选的工作带宽;由于节点可以动态地去选择空闲信道工作,减少了节点因竞争信道而带来的等待和冲突,因此可以提高网络的吞吐量并缩短网络的通信时延。

## 2 无线认知传感器网络

采用认知无线电技术的无线传感器网络称为无线认知传感器网络(CRSN, Cognitive Radio Sensor Network),其定义为<sup>[5,6]</sup>:无线认知传感器网络是由无线认知传感器节点构成的网络,节点具有检测频谱信息并能动态选择未被占用的频谱资源来进行通信的能力,节点检测到事件的发生后,将事件信息利用可用的频谱资源,采用多跳通信方式以互相协作的方式传递出去,以满足特定应用的需求。

到稿日期:2010-08-24 返修日期:2010-11-11 本文受国家自然科学基金广东省联合基金重点项目(U0935002),广东省“211工程”重点学科建设项目,广东工业大学博士启动基金(103042)资助。

王永华(1979-),男,博士,讲师,主要研究方向为传感器网络、物联网等,E-mail:sjzwyh@163.com。

文献[5-8]为无线认知传感器网络的综述性文献,介绍了无线认知传感器网络的概念、架构以及需要解决的问题。文献[3]从物理层和数据链路层分析了基于认知无线电技术的无线传感器网络的实现细节,指出认知无线电技术能够扩大无线传感器网络中节点的通信范围,减少多跳通信的路由次数。文献[9]将认知无线电的思想在基于 ZigBee 技术的无线传感器网络中进行应用尝试,提出一种新的多频多跳的 Ad-hoc 组网方法。文献[10]中为了有效地实现矿井下环境监测,将认知无线电(CR)技术和无线传感器网络(WSNs)技术相结合,提出了 CR-WSNs 的新概念,分析了煤矿井下特殊的工作环境,介绍了适用于矿井的 CR-WSNs 监测系统结构、节点的硬件组成和 CR-WSNs 模块间的通信,并给出了简单的性能测试方案。

### 3 无线认知传感器网络节点

无线认知传感器网络节点主要由控制器、存储器、传感器、认知无线电收发器等组成,如图 1 所示<sup>[1,5]</sup>。

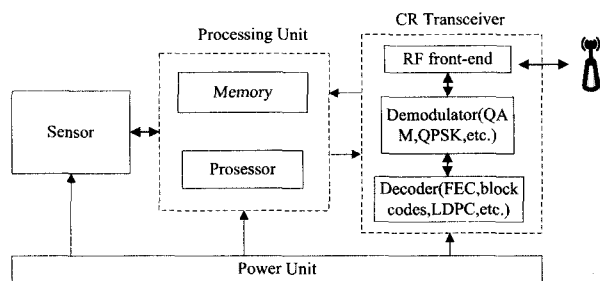


图 1 无线认知传感器网络节点结构示意图

无线认知传感器网络节点与传统的无线传感器网络节点的区别是其具有认知无线电收发器。认知无线电收发器使得传感器网络节点能够动态调整通信参数:比如载波频率、发送频率、调制方案等等。

文献[11]为了提高无线传感器节点及其网络的吞吐量和频谱利用率,引入认知方法增强节点的频谱感知能力,设计了一种多射频接口认知增强无线传感器节点。该节点采用 STR911 系列的 ARM9 微处理器,射频部分选用了 CC2420 芯片和 nRF905 芯片,节点的通信频率可以覆盖 ISM 频段的 433\868\915MHz 频段以及支持 ZigBee 协议的 2.4GHz 频段。节点的平均信道感知时延约为 1.1179ms,满足认知网络中对信道快速感知的要求。该方案相比于 CSMA/CA 方案,通信时延缩短了 11.86%;链路层控制方案能够有效避免干扰对节点间通信的影响<sup>[11]</sup>。文献[12]为了延长资源有限的 CRSN 节点寿命,提出了一个自适应的、能量有效的调制技术,以充分利用电源能量。

### 4 无线认知传感器网络的频谱管理架构

无线传感器网络具有低能耗、硬件简单、自组织等特点,因此现有的认知无线电的研究不能直接应用于无线认知传感器网络。同时,无线传感器网络采用认知无线电技术后,也需要新的算法和协议来解决认知无线电的诸如频谱感知、动态信道切换等关键问题。而对于能量受限的传感器网络,还要考虑实现认知无线电技术过程中的能量消耗。

CRSN 的认知能力表现在能根据动态的无线环境选择合适的通信参数,所进行的自适应性操作形成一个认知循环,如图 2 所示,主要包括<sup>[5,13]</sup> 频谱感知(Spectrum Sensing)、频谱

决策(Spectrum Decision)、频谱共享(Spectrum Sharing)和频谱迁移(Spectrum Mobility)。

频谱感知:检测可用频谱信息,发现频谱空穴。

频谱决策:根据检测到的可用频谱信息特征和 QoS 需求选择适当的频段及传输参数(比如传输功率、调制方式等)。

频谱共享:多个 CRSN 节点协调合作接入信道,以避免相互发生冲突。

频谱迁移:指 CRSN 节点根据可用频谱情况改变其工作信道的过程。

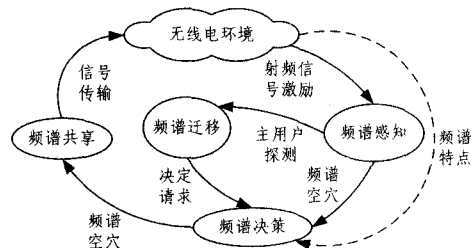


图 2 认知循环

无线认知传感器网络协议体系结构按照与无线传感器网络相似的分法,可分为物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。然而 CRSN 动态使用频谱的通信方式使其需要跨层设计,物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层的功能都是以协作方式实现的,交互如图 3 所示<sup>[5,13-15]</sup>。

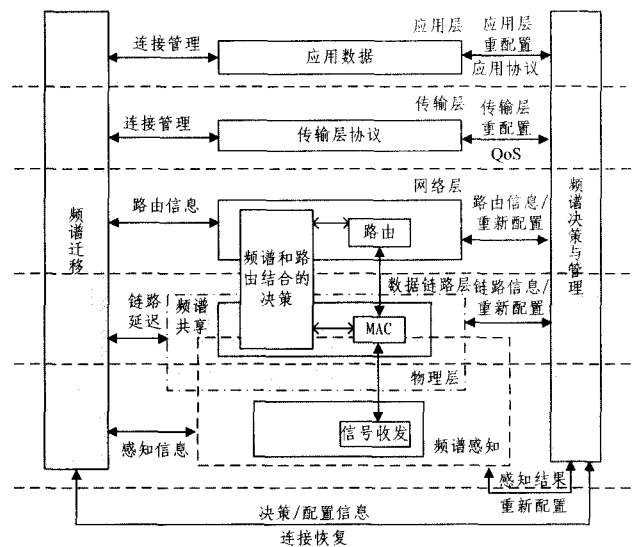


图 3 无线认知传感器网络协议体系结构

#### 4.1 CRSN 频谱感知

除了 ISM 频段外,CRSN 节点还可以有机会使用属于主用户(Primary User, PU)的空闲频段进行通信。因此 CRSN 节点应具有频谱感知功能,这也是与传统的 WSN 的重要区别之一。CRSN 频谱感知的目的是发现频谱空穴,以及在通信过程中能及时检测到 PU 的出现,即时进行频谱切换以避免干扰 PU 业务。频谱感知和传递感知信息会额外消耗能量。频谱感知主要在物理层,而协作检测及感知控制涉及到了链路层。

CRSN 频谱感知主要功能为主用户检测、协作及感知控制<sup>[13]</sup>。

主用户检测:CRSN 节点监测分析所处的无线环境,根据自己及相邻节点的监测结果,确定 PU 是否在通信以及识别出可用的频谱。目前频谱检测的方法主要有<sup>[14,15]</sup> 匹配滤波

检测、能量检测、循环平稳特征检测、干扰温度检测等。但现有的频谱检测方法基本不能直接应用于资源有限的传感器网络节点。

协作检测及感知控制:为了提高感知准确性,CRSN 节点需要与邻居交换感知结果。而节点之间合作需要进行协调和控制,包括感知的时间和通信的时间、感知什么时候开始及结束等。

文献[16]提出了 CRSN 的一种合作能量检测方案,在一些典型衰落信道环境中测试了所提方案的检测概率。仿真结果表明,在计算量低于对方的情况下,性能与 Neyman-Pearson 检测器相当。文献[17]提出了一种采用专用的无线认知传感器网络感知频谱的模式,并把数据融合看作是有明显未知错误输入的边界检测问题,提出了融合频谱感知和支持向量机的边界检测方案,包括 2 个主要部分:一个声明校准算法和一个边界推导算法。并证明了合作频谱检测能渐进接近最优方案。文献[18,19]采用在 CRSN 中主用户和干扰信号是有方向的模型,提出了使用综合波达方向(DOA)的方法估算这种模型的干扰温度的算法。文献[22,23]对无线认知传感器网络提出了基于 OFDM 的合作频谱感知方案,即采用平方率合并(Square-law-combining, SLC)的能量检测法检测主用户的存在。

文献[20]针对 CRSN 频谱感知过程中的能耗,提出了使用可信度投票算法来减少传输检测结果的节点个数;使用基于部分可观马尔科夫决策过程的检测算法减少检测次数。仿真结果表明,这两种算法均能有效减少检测能耗,并保证检测可靠度满足系统要求。文献[21]针对 CRSN 的能源有效感知提出了结合休眠和感知的方案,通过理论上推导出的感知和错误警报的概率分析了这种方案的性能。通过设置最优的休眠时间、感知阈值限制感知和错误警报的概率,来最小化分布式感知中的能量消耗。

由于传感器网络节点低能耗、硬件简单的特点,因此 CRSN 频谱感知存在的可以进一步研究的问题有:

(1)适合低能耗、低计算能力的无线传感器网络节点的频谱感知技术。

(2)优化的协作感知。如何协调分布的 CRSN 节点的感知操作,如何优化 CRSN 节点协作感知结果与由此引起的网络开销、能量消耗以及延迟等因素。

## 4.2 频谱决策

CRSN 节点要根据应用的 QoS 需求以及主用户的工作情况,从感知到的可用信道中选择最合适信道并确定通信参数(带宽、数据速率、传输功率、调制方式等)。频谱决策就是根据实际的 QoS 需求和决策准则,选出合适的频带。频谱决策涉及到了物理层、链路层、网络层、传输层和应用层。CRSN 是多跳的网络,端到端的路由经过多个中间节点,而每一跳可用的信道可能不同,因此在做频谱决策的时候要综合考虑路由和频谱资源因素。

由于都采用相同的决策算法,因此在一个范围内的节点的感知结果将相似或相同。如果节点只根据自己的结果确定信道的話,结果将一致,然后会导致碰撞。如果发生碰撞,所有的节点又切换到其他相同信道,导致新的碰撞产生,并且原有的信道空出,所以 CRSN 节点频谱决策必须进行协调,以提高整体的利用率,最大化能量利用率<sup>[5]</sup>。

现有的认知无线电的频谱决策方法没有把功率消耗以及

通信开销等作为重要因素考虑。然而对于低能耗、低计算能力的 CRSN 而言,这些是必须考虑的。CRSN 频谱决策算法也必须有较低的计算复杂度。

需进一步研究的问题有:

(1)建立适合低能耗、低计算能力 CRSN 的频谱决策模型和算法,以及如何基于通信参数(信噪比、信道容量等)建立适合 CRSN 的频谱决策模型。

(2)合作式重配置<sup>[14]</sup>。在信道发生变化时,CR 技术通过在某个频段内重新配置传输参数就可以保持通信连接状态,而不用重新切换频谱及路由。因此需要研究适合 CRSN 的频谱决策与重配置的合作框架。

(3)建立准确的主用户状态模型。现有的研究中主用户工作状态大都是 ON-OFF 模型,这种模型不精确,因此在频谱决策中需要建立更符合实际的主用户状态模型<sup>[13]</sup>。

(4)在不同种类频段上的频谱决策。CRSN 可利用的频段是 ISM 和一些专用频段。在专用频段上,需要考虑主用户的活动;而在 ISM 频段,所有的 CRSN 都具有相同的接入权利,不用考虑主用户的影响。因此,需要研究 CRSN 在不同种类频段上的频谱决策。

## 4.3 频谱共享

频谱共享是 CRSN 利用空闲频谱需要解决的关键问题,重点是动态频谱分配和动态频谱接入<sup>[13]</sup>。频谱共享是在不对 PU 造成干扰并保证 QoS 的情况下,根据无线环境的变化,动态地分配通信资源及协调 CRSN 节点接入。在频谱决策阶段决定了合适的通信频段后,将其中的信道分配给 CRSN 节点并确定其发射功率,以避免干扰 PU;然后 CRSN 节点确定何时接入哪个具体的信道,以避免与其他节点冲突。频谱共享涉及到了物理层和链路层。CRSN 频谱共享与传统的 WSN 的频谱共享的不同之处在于:不同于以往的静态划分,可用的频谱范围较宽,不同的频谱具有不同的特性;PU 的存在导致空闲频谱资源具有时变性。

频谱分配包括信道分配和功率控制,这方面的研究有:文献[24]在 CRSN 中实现集中式频谱分配,使用修正博弈论方法同时提高分配公平性和频谱利用率,并保证节点的优先权,降低信道切换次数。文献[25]提出一种分布式的信道选择和功率分配算法,使各用户在各信道上的消耗的比特能量最小化;并提出了一种分布式的功率控制算法,避免新用户选择相同信道时的同信道干扰。文献[26]将动态频谱感知与 WSN 相结合,提出了一种避免干扰的低能耗频谱资源分配算法,它在避免对授权用户产生干扰的同时,通过降低信道分配过程中频谱切换发生的概率,降低节点的传输能耗,并根据网络拓扑合理选择中继节点,提高数据传输成功率。但该方法未采用节点协同感知功能,过分依赖簇首。

频谱接入亦即 MAC 技术。传统的 WSN 的 MAC 协议就是为节点提供一个有效公平防冲突的信道接入机制。然而,CRSN 的 MAC 协议还要考虑 CRSN 节点在频谱感知期间不能传输信息、整个网络范围内的控制信道的选择、具有不同优先级的频谱感知和决策结果等因素<sup>[5]</sup>。由于 CRSN 的特性,现有的 CR 的 MAC 和 WSN 的 MAC 协议均不适用于 CRSN,因此需要研究新的方案。

需进一步研究的问题有:

(1)自适应功率控制。CRSN 为密集分布,要针对分布式及集中式的 CRSN 建立合适的功率控制算法,在避免干扰的

同时最大化系统吞吐量。

(2)控制信道的确定。选择哪个信道作为控制信道、确定控制信道的覆盖范围(全局还是局部)以及如何将控制信道信息告知相应的 CRSN 节点等问题都需要解决。

(3)适合 CRSN 的 MAC 方案。需要研究结合频谱感知和决策、低复杂度、能充分利用频谱资源有效公平防冲突的 MAC 机制。

#### 4.4 频谱迁移

频谱迁移发生在主用户出现、信道质量下降或者存在节点移动时<sup>[14,15]</sup>,此时通信中的 CRSN 节点必须切换到其他空闲信道继续通信。CRSN 节点改变工作频率后,网络协议的工作状态也会发生变化,所以频谱迁移的目的是使网络状态变化尽可能地平滑地进行,以确保频谱切换中对通信性能的影响最小。

要完成频谱迁移需要节点具有频谱切换(Spectrum handoff)功能和连接管理功能。

频谱切换中,因为要感知并确定新的可用信道,短暂的通信中断是不可避免的。并且由于频谱分布很宽,节点的射频前端可能需要重新配置,因此会有切换延迟产生。CRSN 中,频谱切换及延迟也会影响协议栈的其他层,比如路由协议和 QoS 管理协议,这就需要进行连接管理。多层的连接管理协议要能根据切换的信道及延迟信息对各层受到的影响进行预测并重构各层参数及差错控制,以维持通信的进行。

频谱切换可以采用两种策略<sup>[13]</sup>:一种是被动频谱切换,当检测到信道质量下降后,CRSN 节点进行频谱切换。这种方法切换前没预先准备,所以通信质量会降低较多。另一种策略是预先频谱切换策略,CRSN 节点在保持现在通信及连接状态的时候同时预测信道状态并确定好候选信道,如果通信的信道发生变化就马上切换。预先频谱切换策略在维持现有通信的时候同时感知其他信道,所以切换速度很快,但是这种同时操作需要较复杂的算法。频谱切换延迟是判断频谱迁移算法最重要的指标,因此需要研究低延迟策略。

需进一步研究的问题有:

(1)切换延迟管理。切换延迟不仅与硬件有关,而且与频谱感知和决策、链路协议、路由等有关,因此需要研究设计合适的跨层策略,减小切换延迟。

(2)研究适合 CRSN 的分布式和集中式的频谱迁移策略,最小化频谱切换对各层的影响。

#### 4.5 网络层

CRSN 的网络层主要解决路由问题,即在源节点和目的节点间建立一条信息传输路径。在 CRSN 中,路由选择和频谱分配是紧密相连的。在考虑动态频谱的情况下,如何迅速地确定到达目的节点的路由,是 CRSN 一个重要的问题。现有的无线认知自组织网络的路由协议<sup>[13]</sup>不适用于资源有限的 CRSN。而现有的 WSN 路由协议为静态频谱分配体制,没考虑动态频谱的因素,因此需要设计适合动态频谱 CRSN 的路由算法。

设计 CRSN 路由算法时,除了传统的 WSN 路由协议考虑的能量高效问题外,还必须考虑因为频谱的移动导致的多跳信道的参数变化,比如信道接入延迟、干扰、工作频率和带宽等。在决定端到端的路由时,必须考虑信道切换产生的影响。在 CRSN 路由表中,要增加通信信道、传输速率、调制方式等参数<sup>[13]</sup>。另外,还要面对因为缺少全局控制信道,如何

传递邻居发现及路由信息的问题<sup>[5]</sup>。CRSN 路由的一个设计方法是路由和频谱管理的协作,而且要考虑主用户对路由的影响。每个节点的可用频谱都是在变化的,动态频谱在时间和空间上的不连续特性需要这种跨层的设计方法。

文献<sup>[27]</sup>针对无线传感器网络受 Wi-Fi 等异构系统干扰日益严重的问题,在引入基于簇的动态多信道组网策略的基础上,综合考虑频谱受干扰程度、信道切换代价、节点剩余能量等因素,提出了一种认知频谱干扰的能量有效的路由(CSIEE)算法。仿真结果表明,该路由与 EEPA, AODV, AODV-EA 路由相比,有效地节约了传感器节点能量,延长了网络生命周期。

需进一步研究的问题有:

(1)研究新的优化的能量有效的、考虑频谱移动、资源限制、密集布置等因素的 CRSN 路由协议<sup>[5]</sup>。

(2)针对需要实时通信的 CRSN,研究不同条件信道下满足 QoS 需求的路由协议。

#### 4.6 传输层

CRSN 传输层负责数据的可靠性传输,包括差错控制、流量和拥塞控制等。CRSN 中,传感器节点在检测到一个事件后,要将信息传递给汇聚节点(SINK),而控制信息等是从 SINK 到传感器节点的传输,这两种信息均需要可靠和及时传输。

CRSN 传输层协议除了要满足资源有限和可靠传输的限制外,还要面对动态频谱管理引起的新的挑战:频谱感知期间不能收发信息、频谱变化导致的路由断开及改变、多径路由、工作频率变化导致的信道参数的变化、频谱切换延迟等。同时,对于实时性的业务,比如目标追踪和监控,可能会对延迟时间有个上限要求,这就对协议的设计提出了挑战。

已有一些针对 WSN 传输层的可靠传输、拥塞控制等的研究<sup>[1,2]</sup>,但均未考虑动态频谱接入的因素。文献<sup>[28]</sup>中提出了一个针对 Ad-hoc 网络的基于 TCP 考虑动态频谱的传输层协议,但是没考虑 CRSN 资源有限的限制和需求。对 CRSN 传输层的研究有:文献<sup>[29,30]</sup>设计并分析了同时支持实时的恒定比特率(CBR)和最大努力交付(BE)业务的采用簇结构的 CRSN 性能。作者考虑了两种不同的优先资源分配策略,为 CBR 业务的延迟和容量性能以及 BE 所需的资源建立了分析模型,并使 CBR 具有较高优先级。结果表明 CRSN 可以取得令人满意的实时性能,并得出结论:应用服务策略不同,BE 所需的资源数量也将不同。

需进一步研究的问题有:

(1)研究针对 CRSN 的考虑动态频谱接入、能量有效的可靠传输控制协议,并能保证传感器和 SINK 之间可靠地双向通信。

(2)对于实时性的业务需要,研究实时保证 QoS 需求、能适应动态频谱变化的可靠传输控制协议<sup>[5]</sup>。

(3)研究能够对频谱切换保持透明的传输层协议<sup>[13]</sup>。

#### 4.7 应用层

无线传感器网络的应用层协议主要是处理信息的产生和提取被监测事件信号的特征,以传给 SINK<sup>[5]</sup>。应用层的协议主要包括传感器管理协议、任务分配和数据广播管理协议、传感器查询和数据传播管理协议等<sup>[31]</sup>。

目前还没检索到 CRSN 应用层的研究文献。

需进一步研究的问题有:

(1)对于多类异构传感器网络覆盖的场合,需要研究对用户的查询进行组织和分析的应用层协议,以及如何在异构网络中高效率传输信息。同样,对于多媒体传感器应用的研究存在的一个问题,是设计一个可以根据不同信道和切换率采用不同编码的自适应编码方案<sup>[5]</sup>。

(2)传感器网络中,旨在降低通信成本和复杂度的数据融合技术得到了广泛的研究。但是,在CRSN中,节点的收发器可能切换到其他信道,从而无法监听到周围所有节点传输的数据。这就需要研究新的聚集和融合技术,解决CRSN多频谱造成的限制<sup>[5]</sup>。

**结束语** 本文对无线认知传感器网络设计和实现的一些关键问题进行了总结。虽然目前已有一些相关研究,但无线认知传感器网络在向实用化发展的进程中还有很多理论和工程方面的实际问题需要解决,在CRSN频谱管理以及跨层设计上都有很大的研究和发展空间。相信随着对无线认知传感器网络研究的不断深入,无线认知传感器网络将会越来越广泛地应用于实际生产生活中。

### 参 考 文 献

- [1] Callaway E J. Wireless Sensor Networks; Architectures and Protocols[M]. US: CRC Press LLC, 2003; 1-17
- [2] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15
- [3] Cavalcanti D, Das S, Wang Jian-feng, et al. Cognitive Radio based Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'08). St. Thomas, US Virgin Islands, Aug. 2008; 1-6
- [4] Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2000
- [5] Akan O B, Karli O B, Ergul O. Cognitive Radio Sensor Networks [J]. IEEE Networks, 2009(7/8): 34-40
- [6] Yau K-L A, Komisarczuk P, Teal P D. Cognitive Radio-based Wireless Sensor Networks: Conceptual Design and Open Issues [C]// The 2nd IEEE Workshop on Wireless and Internet Services (WISe 2009). Zurich, Switzerland; 2009; 955-962
- [7] 陆佃杰, 黄晓霞. 认知无线电在无线传感器网络中的应用[J]. 先进技术研究通报, 2009(11): 18-22
- [8] Zahmati A S, Hussain S, Fernando X, et al. Cognitive Wireless Sensor Networks: Emerging topics and recent challenges[C]// Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference. Toronto, Sept. 2009; 593-596
- [9] 张欣, 贾明华. 认知无线电思想在 ZigBee 无线传感器网络中的应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009(7): 15-18
- [10] 王泉夫, 陈丽华, 钟强, 等. 认知无线电在矿井无线传感器网络系统中的应用[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(8): 113-115
- [11] 刘智武, 吴威. 认知增强型无线传感器节点设计[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(12): 1963-1970
- [12] Han N, Shon S H, Joo J O, et al. Spectrum Sensing Method for Increasing the Spectrum Efficiency in Wireless Sensor Network [J]. Ubiquitous Computing Systems, 2006, 4239: 478-488
- [13] Akyildiz I F, Lee W-Y, Chowdhury K R. CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009(7): 810-836
- [14] 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
- [15] 周贤伟. 认知无线电[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- [16] Hu Fu-ping, Wang Shu. Energy detection for spectrum sensing in cognitive radio sensor network over fading channels[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing, 2009; 1511-1514
- [17] Yang Yan-yan, Liu Yun-huai, Zhang Qian, et al. Cooperative Boundary Detection for Spectrum Sensing Using Dedicated Wireless Sensor Networks[C]// IEEE INFOCOM 2010 Proceedings. San Diego, CA, March 2010; 1-9
- [18] Ma Wei, Wu Mu-qing, Li Guan-nan, et al. Interference Temperature Estimation Based on the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wide-band Sources in Cognitive Radio Sensor Networks[C]// Second International Symposium on Electronic Commerce and Security (ISECS '09). Nanchang, May 2009; 417-420
- [19] Li Guan-nan, Yang Li, Zhang Ning, et al. Cooperative frequency spectrum sensing based on the spatial spectral estimation in cognitive radio sensor networks[C]// 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT 2009). Beijing, Aug. 2009; 263-266
- [20] 邹丹, 钟国辉, 屈代明, 等. 无线认知传感器网络的节能频谱感知策略[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(10): 1052-1058
- [21] Maleki S, Pandharipande A, Leus G. Energy-efficient spectrum sensing for cognitive sensor networks[C]// IECON 2009 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Porto, Nov. 2009; 2642-2646
- [22] Ma Wei, Wu Mu-qing, Liu Dong, et al. User sensing based on MIMO cognitive radio sensor networks[C]// 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT 2009). Beijing, Aug. 2009; 205-208
- [23] Ma Wei, Hu Sen-zhe, Wang Yan-cong, et al. Cooperative Spectrum Sensing in OFDM Based on MIMO Cognitive Radio Sensor Networks[C]// 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom '09). Beijing, Sept. 2009; 1-4
- [24] Byun S-S, Balasingham I, Liang Xue-dong. Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Cognitive Radio Sensor Networks: Improving Fairness and Energy Efficiency[C]// Proceedings of IEEE 68th Vehicular Technology Conference. Calgary, BC; 2008; 1-5
- [25] Gao Song, Qian Li-jun, Vaman. Distributed Energy Efficient Spectrum Access in Wireless Cognitive Radio Sensor Networks [C]// Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008, IEEE). Las Vegas, NV; March 31-April 3, 2008; 1442-1447
- [26] 章坚武, 赵琪, 邹靖媛. 避免干扰的低能耗无线传感器网络动态频谱分配算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(10): 1481-1485
- [27] 刘斌新, 蒋挺. 基于认知的无线传感器网络抗干扰路由算法[J]. 数字通信, 2010, 37(1): 66-70
- [28] Chowdhury K R, Felice M D, Akyildiz I F. TP-CRAHN: A Transport Protocol for Cognitive Radio Ad-hoc Networks[C]// Proceedings of the IEEE Infocom 2009. Rio de Janeiro, Brazil; April 2009; 2482-2490
- [29] Liang Z, Zhao D. Quality of Service Performance of a Cognitive Radio Sensor Network[C]// 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC). Cape Town, May 2010; 1-5
- [30] Feng S, Zhao D. Supporting Real-time CBR Traffic in a Cognitive Radio Sensor Network[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Sydney, Australia, April 2010; 1-6
- [31] Akyildiz I F, Su Wei-lian, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-116