



研究与开发

异质节点分离 CRSN 中 MAC 协议设计与性能分析

孟得月, 裴二荣, 黄佑林
(重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要: 认知无线传感器网络 (CRSN) 是一种将认知无线电 (CR) 技术引入传统 WSN 中的新型网络, 具有一定的应用价值和发展前景。然而, CRSN 中的认知功能带来的额外能耗和处理要求及其高成本实现, 阻碍了它的进一步发展及应用。基于此, 提出将认知功能迁移到另外一类节点——认知节点, 并使其拥有较强的处理能力和能量收集能力。认知节点与普通传感器节点按照一定比例进行部署, 组成另外一种新型网络——异质节点 CRSN (HT-CRSN), 这种新型网络能够提高网络性能并降低部署成本。并提出了一种能够适用于这种异质节点传感器网络的工作时序及其一系列可行性的 MAC 协议 (FBP 等)。通过对所提 MAC 协议的能耗分析, 说明可以通过调整两类异质节点的部署比例和能量收集速率均衡两类异质节点的能耗, 进而提高网络生命周期。

关键词: 无线传感器网络; 认知无线传感器网络; 异质节点; 工作时序; MAC 协议

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017222

Design of MAC protocol and performance analysis for heterogeneous nodes separating CRSN

MENG Deyue, PEI Errong, HUANG Youlin

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Cognitive wireless sensor network (CRSN) is a new type of network that introduces cognitive radio (CR) technology into traditional WSN, and has certain application value and developmental prospect. However, the additional energy consumption, processing requirements and its high cost implementation have hindered its further development and application. Based on this, transferring cognitive functions to another nodes——cognitive nodes which have ability of processing and collecting energy was proposed. The cognitive nodes were deployed with the ordinary sensor nodes according to the certain proportion. They form a new type of network——heterogeneous node CRSN (HT-CRSN). The new network can improve network performance and reduce the deployment cost. Then a work schedule which can be applied to this kind of heterogeneous node sensor networks and a series of feasible MAC protocols was proposed. The analysis of the proposed MAC protocol proves that energy consumption can be balanced by adjusting the deployed ratio of the two kinds of heterogeneous nodes and the network life cycle is improved.

Key words: wireless sensor network, cognitive wireless sensor network, heterogeneous node, work schedule, MAC protocol

收稿日期: 2017-01-22; 修回日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61379159); 重庆市基础和前沿项目 (No.CSTC2013jcyjA40020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61379159), Chongqing Basic and Cutting-Edge Project (No.CSTC2013jcyjA40020)



1 引言

21 世纪以来,无线通信、微芯片制造等技术的进步促进了 WSN (wireless sensor network, 无线传感器网络) 的大规模部署。然而,工作在免授权工业、科学、医学(industrial scientific medical, ISM)频段的 WSN 与其他无线通信技术(如 Wi-Fi、蓝牙、WiMAX、ZigBee 等)频谱共享,导致各种无线设备间的干扰日益严重,显著降低 WSN 性能,影响了 WSN 的继续发展。

近几年,认知无线电(cognitive radio, CR)技术受到了学术界的广泛关注,由于 CR 具有频谱感知和动态改变其工作参数的能力^[1],一些研究人员提出将 CR 技术引入 WSN,由这些具有 CR 功能的传感器节点组成的网络就称为认知无线传感器网络(cognitive radio sensor network, CRSN)^[2,3]。

与传统 WSN 相比,CRSN 在动态频谱接入、并发数据的伺机信道利用、适应性的能耗降低、多个异构 WSN 的重叠部署等方面拥有较大的优势,并且具有一定的应用价值和发展前景。

然而,CRSN 的实现面临着以下几个挑战性的问题^[3]:

- 传感器节点固有的资源(能量和处理能力)约束;
- 认知功能带来的额外通信和处理要求;
- 低成本和功率高效的认知传感器节点的设计;
- 密集部署的 WSN 中无需授权和授权频段上的多跳伺机通信等。

在这几个挑战性问题中,第 4 个问题是 CRSN 实现的具体技术问题,相对于其他问题而言不难实现。研究前 3 个挑战性问题不难发现,这几个挑战性问题产生的根源可以归结于以下两个主要矛盾:

- 认知功能带来的额外能耗和处理要求与传

感器节点固有资源(能量与处理能力)约束的矛盾;

- 认知功能导致的 CRSN 高成本实现与其低成本要求的矛盾。

具体地说,与传统 WSN 相比,CRSN 中的传感器节点额外增加了频谱感知、频谱切换等功能,极大地消耗了传感器节点本已受限的能量和处理能力;另外,网络中的传感器节点处理能力有限,常常需要多个传感器节点进行协作频谱感知后再通过协调器融合判决,它们之间感知信息的交互也导致了大量的能耗。这些由认知功能带来的额外能耗和处理要求与传感器节点固有的资源约束产生了巨大的矛盾,极大地增加了认知传感器节点的设计难度。如果不加以解决,将极大地缩短 CRSN 的生命周期,阻碍 CRSN 的发展与应用(与第一个矛盾对应)。

CR 接收机的生产成本取决于其频谱感知所采用的技术,技术越复杂则越昂贵,精确度也越高。以最简单的基于能量探测的频谱感知技术为例(这种技术需要在短时间内探测大量的样本,然后计算它们的加权或等权平均值,再与预先设定的阈值比较),它的生产成本也远高于只能进行简单处理的廉价传感器节点。WSN 节点往往是大规模部署在某一监测区域,并且在每个传感器节点上都搭载一个 CR 接收机,因此增加了网络的部署成本,进而增加了低成本认知传感器节点的设计难度。如果 CRSN 的高成本部署问题不加以解决,那么定位于低成本、低功耗的 CRSN 就失去了存在的价值和市场应用前景(与第二个矛盾对应)。

因此,在认知功能给 CRSN 带来众多优点的情况下,如何解决这两个主要矛盾是摆在研究人员面前的一个极具挑战性的问题。就目前发表的与 CRSN 相关文献来看,这个问题并没有得到解决,甚至没有得到重视。

能量收集(energy-harvesting)技术是一种能

将环境能量（太阳能、风能等）转化为电能的技术。通过当前期望的能量水平调整性能参数，这种技术有望替代传统的供电传感器节点，具有缓解 CRSN 额外能耗的潜能^[4-6]。

基于现有 CRSN 的缺点以及能力收集技术的最新研究，本文提出将 CRSN 节点的认知功能独立成另外的节点，即认知节点（cognitive node, CN）。CN 在网络中的主要功能是频谱感知和协调完成通信任务（中继转发等）。拥有最新的能量收集技术的 CN 可以有效弥补其在工作中的能耗较多的缺陷。虽然 CN 的生产成本较高，但是可以通过少量部署（如按照 CN 和传感器节点 1:N 的比例部署）的原则降低整个网络的硬件成本。因此一个包含 CN 和传感器节点（sensor node, SN）的 CRSN 并不会比传统的 CRSN 造价更高，而会更少。这种新型节点有望解决上述提出的两个主要矛盾，促进 CRSN 不断发展。

这种拥有新型认知节点的网络是由两种不同类型的节点组成，为区别传统 CRSN，本文称其为异质节点 CRSN（heterogeneous node CRSN, HT-CRSN）。同时，传统 CRSN 被称为同质节点 CRSN（homogeneous node CRSN, HM-CRSN）。

在 HT-CRSN 中，CN 负责可用频谱的感知和数据的中继传输，SN 负责对周边环境进行探测和数据采集。每次 SN 采集到的数据需要传输时，CN 则将探测到的空闲频谱通知 SN，然后 SN 使用分配的信道和时隙进行发送数据，因此，SN 也

需要有动态改变工作参数的能力。显然在 HT-CRSN 中，两种异质节点只有紧密结合、协调有序地工作才能完成每次的通信任务。因此有必要开发出一种适合于这种异质节点共存的 CRSN 的工作时序及其相应的 MAC 协议，使它们能够正常工作并发挥出这种新型网络的优势。HT-CRSN 与 HM-CRSN、WSN 3 种网络中节点功能的对比见表 1。

目前大量的基于 WSN 的 MAC 协议已经发表^[7-13]，但是它们没有考虑到 CR 技术带来的改变，显然不能直接应用于 CRSN；同时目前基于 CRSN 的 MAC 协议也已经有较多文献^[14-22]发表，然而因为它们都是基于认知功能和传感器节点一体化，即基于同质节点的 MAC 协议，没有对相互独立的 CN 和 SN 的协调工作进行研究，也无法用于 HT-CRSN 中。参考文献[23]提出了一种在异质认知无线网络（heterogeneous cognitive radio network）环境中的基于群论框架（group-theoretic framework）的交汇协议。然而，这篇文献中所提到的异质环境在于认知节点的属性不同，如认知节点间的同步时间、所探测到的信道以及信道标签函数的不同，与本文中所提到的异质节点环境完全不同。参考文献[24]基于异质信道环境，分簇过程中传感器节点很难发现簇头问题，通过引入短暂的支持节点（temporary support node），提出了一个新颖的能量有效的紧凑分簇方案。然而，在这篇参考文献中所提到的这种支持节点只是短暂的辅助节

表 1 3 种网络节点的比较

功能	HT-CRSN		HM-CRSN	WSN
	传感器节点	认知节点	认知传感器节点	传感器节点
数据采集	是	否	是	是
频谱感知	否	是	是	否
能量采集	否	是	否	否
生产成本	很低	很高	高	很低
改变工作参数能力	是	是	是	否



点,与本文中所提的认知节点与传感器节点分离有极大的不同。参考文献[25]是在异质信道环境下的动态资源分配问题,首先在已知信道分配的假设下,使用拉格朗日对偶算法,解决最佳的功率问题,然后利用离散随机优化算法,解决联合信道和功率的分配问题。然而,本文主要的研究问题是两种节点的协调工作,因此与本文主要研究的内容联系不大。

本文在提出 HT-CRSN 后,为这种异质节点的传感器网络设计一种新的工作时序以及适应这种新型网络的一系列可行的 MAC 协议。相对于传统的 MAC 协议,在本文所提的 FBP (fast broadcast protocol, 快速广播协议)、FRP (fast data relay protocol, 快速数据中继协议)中,这种新型网络中的两类异质节点的能耗均衡可以通过调整 CN 和 SN 的部署比例以及 CN 的能量收集速率而获得,通过仿真分析可知,基于本文所提的 MAC 协议,可以有效地均衡能耗,提高网络生命周期。同时本文对 HT-CRSN 的吞吐量、时延、网络开销也做了分析说明。

2 网络模型

假定 M 个 CN 和 N 个 SN 均匀部署在一个以 sink 节点为圆心、 R 为半径的监测区域,如图 1 所示。虽然实际中可能无法得到这样一个完全均匀的分布场景,然而为了试验,近似均匀地部署在监测区域并不难做到。

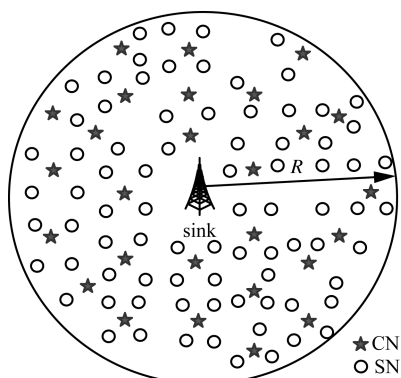


图 1 网络模型

CN 和 SN 都只配备一个收发器,在同一时刻只能发送或接收数据。SN 虽然不具有频谱感知功能,但是它应该具备改变工作参数的能力,这样传感器节点才能根据 CN 探测到的信道发送数据。CN 拥有比 SN 更强的处理能力以及更多的初始能量,并且还搭载有能量收集设备,这样 CN 可以不断地收集能量,延长网络的生命周期。

假定部署的 CRSN 可以机会利用多个授权信道,并且可以使用一条公共控制信道传递控制信息。其中 CN 和 SN 的部署比例取决于它们的初始能量、CN 的能量收集速率及其能耗速度。基于一定的能量收集速率,通过调整 CN 和 SN 的部署比例可以达到 CN 和 SN 之间的能耗平衡。

无线电能量耗散模型采用参考文献[13]中所提到的模型,发送 k bit 消息的能耗为:

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + kE_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + kE_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收 k bit 消息的能耗为:

$$E_{rx}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 是发射或接收每比特信息所消耗的能量, E_{fs} 与 E_{mp} 为节点发射放大电路在单位面积内传播每比特信号所消耗的能量, d_0 为一个门限距离,当节点间的距离 $< d_0$ 时,使用自由空间模型;当节点间的距离 $> d_0$ 时,使用多路径衰减模型。

3 基于 HT-CRSN 的 MAC 协议

HT-CRSN 与传统的 CRSN 不同,它的两类异质节点的能量和性能完全不一样,承担完全不同的工作任务,因而需要两类节点协调工作才能完成通信任务。因此,为了使两类完全不同的、分离的异质节点紧密结合、相互协调地工作,需要设计一个适合异质节点分离的传感器网络的工作时序以及一系列的 MAC 协议控制其工作。

3.1 网络初始化及分组阶段

在网络初始化阶段, 汇聚(sink)节点首先向网络中的CN广播自己的位置坐标信息。所有CN和SN根据相应的定位算法计算自己的位置坐标。基于现有的邻居发现算法^[29], 每个CN和SN都能够找到它们自己邻近的SN和CN以及它们的位置信息。因此网络能够根据邻近节点的位置信息进行分组。

(1) 基于最短距离的分组

SN向距离自己最近的CN申请加入组。这种分组方式的最大优点是简单, 也不轮动, 因而基本没有开销。然而, 这种分组导致节点能耗无法均衡, 靠近sink节点的CN以及距离CN较远的SN节点首先死亡(靠近sink节点的CN由于要负责数据转发, 能耗大, 因此死亡较早)。死亡的CN所属的SN可以就近加入附近的CN组继续工作, 距离CN较远的SN死亡并不会影响组内工作。因此这并不是一种最优的分组方案。但是本文重点在于研究异质节点下, 网络如何高效有序地工作, 因此选择这种简单易行的方案。

(2) 基于非均匀半径的分组(适合节点随机部署的场景)

如果节点随机部署, 那么就有可能实现非均匀半径的分组, 用来平衡各CN间的能耗。CN距离sink节点越近, 中转数据次数越多, 能耗也就

越大。因此, 离sink节点越近, 其半径越小; 离sink节点越远, 其半径越大。这种分组方法能够平衡CN之间的能耗, 然而仍然没有办法做到SN之间的能耗平衡。并且只要CN不提前死亡, 那么监测面积就不会受到较大影响。相对于第一种分组方案来说, 基于非均匀半径分组的方案比较复杂, 所以并不是本文的最佳选择。

3.2 数据传输阶段

分组完成后, 各节点依次按序进行工作, 如图2所示。其中图2上端为在不同阶段使用到的不同的MAC协议。

(1) CN的频谱感知和SN的数据采集

在分组中, CN作为组头承担频谱感知、频谱判决、分配信道、融合数据、中转数据等功能, SN负责数据采集并发往组头。而这些工作必须由两类异质节点的协调配合才能有序完成。CN频谱感知后进入频谱判决及分配阶段, 而SN数据采集完成后进入睡眠状态以节省能量, 同时等待接收分配信道的广播通知, 如图2所示。

(2) 空闲频谱的广播

在网络初始化阶段, 基于邻居发现算法, 各CN可以获知自己的邻近节点。在空闲频谱广播阶段, 各CN需要将自己探测出的空闲频谱利用广播协议通知给邻居节点。然而现有文献中提出的广播协议都是基于能量有效的MAC协议, 如

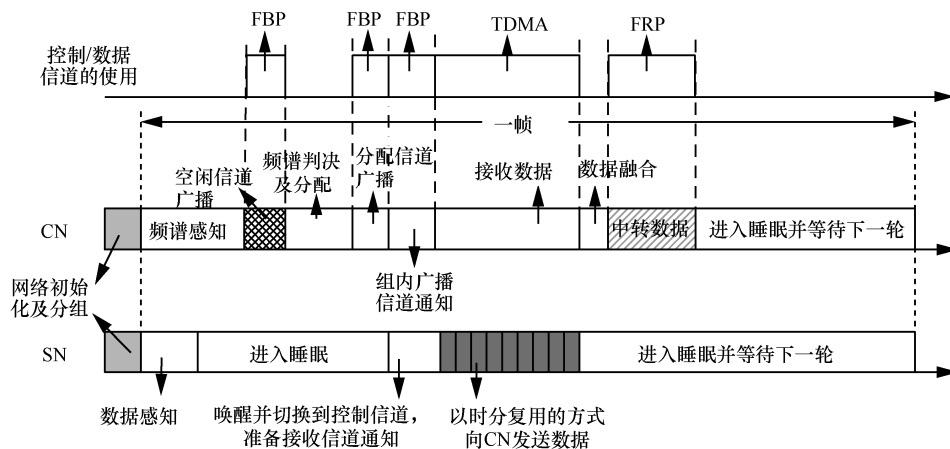


图2 HT-CRSN工作时序



B-MAC^[25]、S-MAC^[26]、T-MAC^[27]、X-MAC^[28]等。而在 CRSN 环境中,特别是在 HT-CRSN 中,探测出来的频谱具有时效性,时间越长,与主用户冲突的概率也越大,因此应该尽可能快速地将空闲频谱信息广播给邻近节点。另外,现有的 IEEE 802.11 协议的 CSMA/CA 主要针对通用的点对点通信协议,显然也无法适应多个节点同时需要发送广播信息的场景,因此需要对 HT-CRSN 中的广播 MAC 协议进行重新设计。

基于公共控制信道的 FBP 流程如图 3 所示,具体过程如下。

步骤 1 所有 CN 从 $(0 \sim N) \times T$ (T 为大于 $SIFS$ 的一段时隙) 中随机选择一个值,作为退避时间。

步骤 2 退避时间归零后即向其邻近节点(初始阶段已经获知)广播 RTS 分组,并分配邻近节点确认时隙。

步骤 3 邻近节点收到 RTS 分组后,冻结其计时器,并按照分配的时隙依次向发送节点发送

CTS 分组。

步骤 4 发送节点收到邻近节点所有的确认 CTS 分组后,即开始广播。

步骤 5 如果没有收齐,则推迟 $(0 \sim n) \times T/n$ (n 取决于发送节点可能发生碰撞的最大个数,一般取值为邻近节点个数的最大值)后重发针对目的节点(即发生冲突没有发送 CTS 的节点)的 RTS;如果发送节点收到目的节点发送给其他节点的 CTS,意味着二次竞争失败,需要等待,直到接收到目的节点发送给其他发送节点的 ACK 后再次发送针对该目的节点(冲突节点)的 RTS。

步骤 6 接收到广播信息的节点依次发送 ACK,并继续启动计时器;发送节点收齐 ACK 后,保持监听状态,直到邻近节点的信息全收齐。

步骤 7 如果没有收齐 ACK,意味着有的接收节点没有收到广播信息,则推迟 $(0 \sim N/(2 \times i)) \times T$ (i 为重发信息的次数)时间,等待再次竞争信道

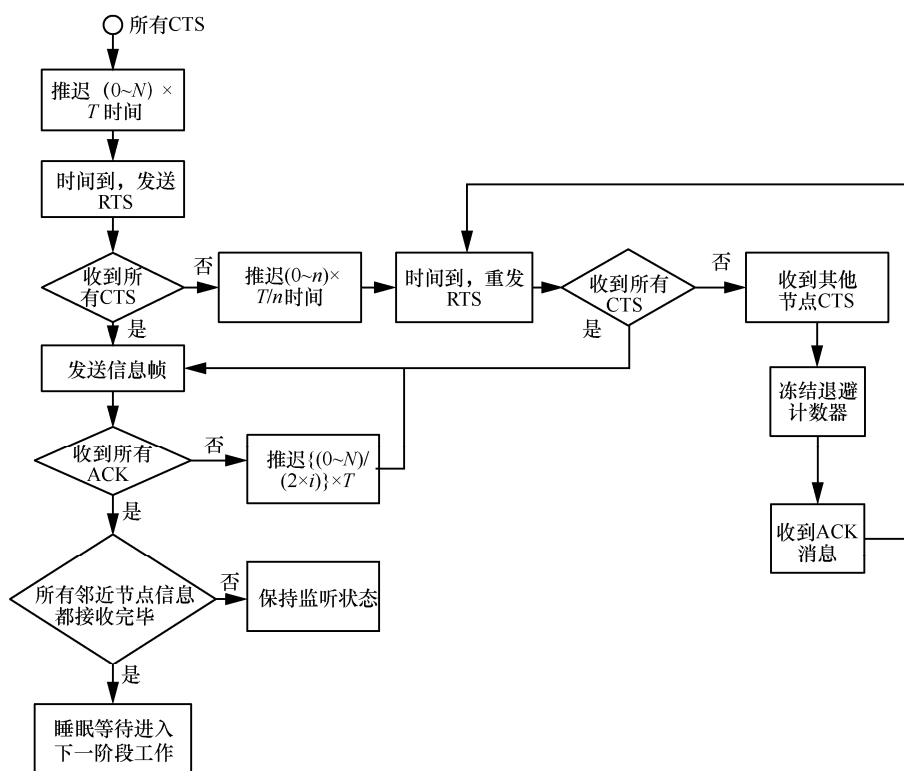


图3 FBP 流程

给目的节点（没有收到信息的节点）重发信息，直到收到所有的 ACK（即所有的接收节点均接收到广播信息）。

由于 FBP 具有时效性，因此在 CN 探测到空闲频谱后，可以快速地通知给邻近节点，这样可以减少与主用户冲突的概率，提高广播通知的准确性。

(3) 频谱判决及分配

为了度量每个探测出来的空闲信道的可信度，将邻近组（包括本组）中 CN 探测到信道 i 的个数定义为空闲信道 i 的可信度，即 $c_i = \sum_r \sigma_r$ ，

r 为邻近组 CN 序号， $\sigma \in \{0,1\}$ 。频谱感知阶段完成后，CN 向邻近 CN 广播探测结果，各 CN 收到邻近 CN 发来的探测结果后计算各信道的可信度。

频谱分配原则：每个 CN 独立计算各信道的可信度，选择可信度最高的信道作为本组的数据信道。这样做的目的是尽可能降低误探测带来的严重后果。因此，有些组可能会共用某个数据信道。

另外，为了解决数据中转阶段动态的多信道环境下的信道交汇问题^[19]，这里需要将 CN 分配的信道消息再次广播给邻近节点（避免产生信道干扰）。

(4) CN 向组内 SN 广播信道分配通知及发送/接收数据阶段

在这个阶段，CN 首先调整发射功率，使其发射范围恰好覆盖到本组范围。为了避免边缘 SN 受到共信道干扰导致一些 SN 无法收到分配信息以及相邻组可能使用到相同数据信道时一些边缘 SN 同时向 CN 发送数据，可能的信道冲突如图 4 所示（图 4(a)为公共控制信道冲突，图 4(b)为相邻组分配到相同数据信道引起的共数据信道冲突），本部分组内广播信息时也采用前文所属的 FBP，只是这里只有 CN 向组内 SN 发送通知，SN 发送反馈。

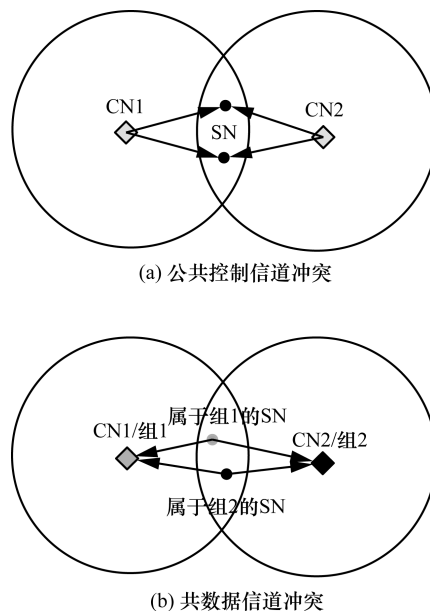


图 4 可能的信道冲突

使用 FBP 的优点是可以错开邻近 CN 或者邻近组可能的共信道冲突避免重发。具体 MAC 协议如下。

- CN 将发射功率调整到其发射范围恰好覆盖到本组范围。
- 各 CN 运行 FBP, CN 向本组 SN 发送 RTS。
- 接收到所有 SN 的 CTS 的 CN 发送本组分配的信道及时隙。
- 成功接收到各 CN 发送的信道和时隙后，SN 则立即广播 ACK。
- CN 和 SN 收发机参数都切换到本组分配的数据信道。
- SN 依次向 CN 发送数据。
- 接收到 ACK 的 SN 立即进入睡眠状态。
- CN 则进入数据融合阶段。

(5) 数据融合及中转阶段

CN 对收到的组内数据进行融合，然后中转发送到 sink 节点。由于不能由 CN 直接发送数据到 sink 节点，因此如何更好地选择下一跳节点，是数据传输很重要的因素。

在传统的 MAC 协议中，节点在进行数据传输时，下一跳节点是确定的，即在 MAC 层发送



节点与下一跳节点进行信息交互后,再在路由层进行数据传输。本文对传统的 MAC 协议进行改进,下一跳节点不是固定的,即在 MAC 层进行下一跳节点的选择后,再由路由层进行数据分组的传送。

在进行下一跳节点的选择时,每一个发送节点都有一个竞争节点集(备选为下一跳节点的一个集合),竞争节点集由发送节点的邻近节点构成(网络初始化阶段已经获得),再将竞争节点集的每一个节点进行优先级排序,其中竞争节点集的排序主要依赖于 3 个因素:网络传递率、最佳传输次数和节点的剩余功率。

假设 A 为发送节点, B 为接收节点,设 A 发送数据分组的个数为 y , B 接收数据分组的个数为 x ,网络传递率为 m ,最佳传输次数为 n , m 、 n 的计算如下:

$$m = x / y, n = 1 / m = y / x \quad (3)$$

在进行优先级排序时,主要依赖于一个排序指标 V ,其中, V 的计算如下:

$$V = (1 - \theta) P_i \cdot m - \theta n \quad (4)$$

其中, θ 为 0~1 之间的一个因子, P_i 为节点的剩余功率。

由此可见, V 的值越大,节点的优先级顺序越高; V 的值越小,节点的优先级顺序越低,将竞争节点集的优先级顺序排列以后,按照优先级顺序的高低即可进行数据的传输。

CN 发送节点与竞争节点的信息交互过程如图 5 所示。CN 间的 FRP 具体如下。

- 在传输数据前,发送节点以及竞争节点集内的节点将接口切换到控制信道上。
- 发送节点向竞争节点广播 RTS,其中,RTS 包括竞争节点集的优先级顺序以及可用信道列表。
- 竞争节点接收到 RTS 后,获知自己的优先级位置,并且结合自己的可用信道,选择一个数据传输信道。

- 将选择的信道附加到 CTS 中回复发送节点(在回复 CTS 时高优先级节点优先回复,隔一段时间后,低优先级节点再进行回复)。
- 发送节点接收到 CTS 后,则等待进行数据的发送。
- 发送节点接收到 CTS 后,则获得了下一跳竞争节点以及用于传输的信道(但是可能还有低优先级的节点等待回复 CTS 分组,因为等待时间长所以会有时延)。
- 发送节点广播 CTR 分组(目的是告诉低优先级节点发送节点已经收到 CTS,因此低优先级节点收到 CTR 后丢弃 CTS)。
- 发送节点发送完 CTR 后,则与下一跳节点在已获得的数据信道上进行数据传输,当发送节点收到 ACK 后则数据传输成功。

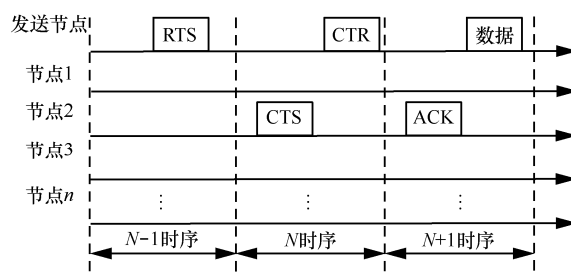


图 5 CN 节点与竞争节点的信息交互过程

4 数值仿真及可行性分析

对所提协议进行可行性分析,包括 CN 与 SN 的能耗(即网络生命周期)、吞吐量、协议开销及时延。值得注意的是,本文所提的协议是 HT-CRSN 工作的一系列可行性协议,但是它在理论和工程方面还存在一些待解决的问题,因此各部分协议的优化工作将是今后的一个重点研究内容。

进行可行性分析的目的在于证明本文所提出的 HT-CRSN 能够在本文所提的工作时序及其一系列 MAC 协议的支持下正常工作,进而证明这种新型网络在实际中的部署是可行的。

4.1 能耗分析

HT-CRSN 的工作时序如图 2 所示,在一帧的

时间内, CN 工作包括频谱感知、空闲频谱的广播、组内分配信道广播、接收数据、融合数据及中转数据。而 SN 的工作过程较简单, 包括数据采集及发送数据, 因为节点能耗大部分在通信模块, 因而数据采集能耗忽略不计。

本部分计算分析 CN 和 SN 能耗的均衡性的目的是证明 HT-CRSN 在所提协议支持下正常工作的可行性, 因此在计算 CN 能耗中, 采用一种理想情况来计算能耗, 如 100% 的探测准确率、FBP 中节点监听状态时间忽略不计等。

假定 CN 具有能量收集能力, 虽然能量收集往往是不确定性的, 并且受到环境影响。然而, 本文主要关注能量在 CN 上的增加, 故忽略其具体细节。以一轮 (或一帧, 下文不加区分使用) 的时间周期来看, CN 能量的增加可用式 (5) 近似:

$$E_{CN} = E_{ini} + \alpha n \quad (5)$$

其中, α 为每轮时间内平均所采集到的能量, E_{ini} 为每轮时间内平均所采集到的能量, n 为轮次/帧。

假定 CN 与 SN 都均匀分布在监测区域 (理想分布), 因此可以认为每个 CN 都管辖一个正六边形的区域。为了便于计算, 取其内切圆进行计算, 如图 6 所示。

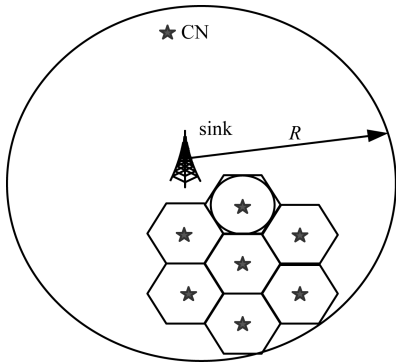


图 6 场景理想分布

在图 6 所示的监测区域内, 每个 CN 监测区域的直径为:

$$D = 2\sqrt{R^2 / N_{CN}} \quad (6)$$

其中, R 为监测区域半径, N_{CN} 为部署的 CN 的数量。

由图 6 可以看出, 在理想分布情况下, 执行 FBP 时, 每个 CN 平均都需要和相邻 6 个 CN 交互信息, 并且在这个阶段每个节点大约需要发送 14 (实际为 $13+x$) 个分组, 接收 24 (实际为 $18+y$) 个分组 (如图 3 所示)。因此, 执行 FBP 时每个 CN 平均所消耗的能量为 (不考虑重发情况):

$$E_{CN-FBP} = 38L_{\text{signal}}E_{\text{elec}} + 14L_{\text{signal}}\epsilon_{\text{fs}}D^2 \quad (7)$$

其中, L_{signal} 为信令分组长度。

基于 FBP 的组内广播 CN 平均消耗的能量为:

$$E_{\text{bro}} = 2(N_{\text{SN}} + N_{\text{SN}} / N_{\text{CN}})L_{\text{signal}}E_{\text{elec}} + (2N_{\text{SN}} / N_{\text{CN}})L_{\text{signal}}\epsilon_{\text{fs}}(D/2)^2 \quad (8)$$

组内 CN 接收数据平均消耗的能量为:

$$E_{\text{rece}} = (N_{\text{SN}} / N_{\text{CN}})L_{\text{data}}E_{\text{elec}} \quad (9)$$

融合数据消耗的能量为:

$$E_{\text{fusedata}} = L_{\text{data}}E_{\text{fuse}} \quad (10)$$

其中, L_{data} 为融合数据的总比特数, E_{fuse} 为融合每比特数据消耗的能量。

监测区域数据分组最大中转次数为:

$$m = R / D \quad (11)$$

平均中转次数为:

$$s = (1 + m) / 2 \quad (12)$$

每个数据分组中转平均消耗能量为:

$$E_{\text{transfer}} = (sL_{\text{data}} + 2L_{\text{signal}})E_{\text{elec}} + (sL_{\text{data}} + 2L_{\text{signal}})\epsilon_{\text{fs}}D^2 \quad (13)$$

每组或者每个 CN 一轮中平均消耗能量为:

$$E_{\text{total-CN}} = E_{\text{sense}} + 2E_{\text{CN-FBP}} + E_{\text{bro}} + E_{\text{rece}} + E_{\text{fusedata}} + E_{\text{transfer}} \quad (14)$$

其中, 每个 CN 一轮中执行两次 FBP。

SN 在一轮中平均消耗能量为:

$$E_{\text{total-SN}} = 4L_{\text{signal}}E_{\text{elec}} + L_{\text{data}}E_{\text{elec}} + (L_{\text{data}} + 2L_{\text{signal}})\epsilon_{\text{fs}}(D/2)^2 \quad (15)$$



其中, SN 与 CN 的距离为 $\frac{D}{2}$ 。

数值仿真参数值见表 2。

表 2 数值仿真参数值

参数	取值
N_{SN}	200
E_{ini}/J	10
E_{SN}/J	1
$L_{\text{signal}}/\text{bit}$	80
$\varepsilon_{\text{fs}}/(\text{pJ} \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^2)^{-1})$	100
$E_{\text{fuse}}/(\text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1})$	10
$L_{\text{data}}/\text{bit}$	2 000
$E_{\text{sense}}/\text{mW}$	5.89
$E_{\text{elec}}/(\text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1})$	50

CN 个数与节点能耗均衡性对比如图 7 所示。由图 7 可知, CN 和 SN 的生命周期差(即节点的能耗均衡性)随着 CN 个数的增加先下降到 0 然后再增加。也就是说,通过调整 CN 和 SN 个数比例, CN 和 SN 的能耗总能获得均衡(即两类异质节点的生命周期相等)。同时也可以看出,随着 CN 能量收集速率的增加,能耗均衡点所需要的 CN 个数在减小,这意味着部署成本下降,额外开销减小。

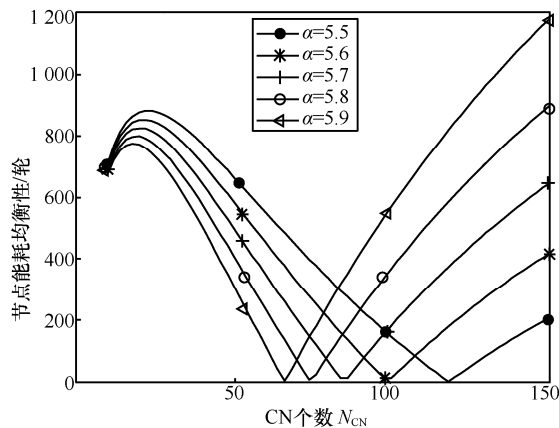


图 7 CN 个数与节点能耗均衡性对比

单位 CN 网络生命周期与能量收集速率对比如图 8 所示。由图 8 可知,在初始能量一定时,随着能量收集速率的递增,单位 CN 的生命周期也随着增加,这是因为随着能量收集速率的增加,网络

中节点的能量也会随之增加,这样就可以平衡认知功能所带来的额外能耗,提高网络的生命周期。

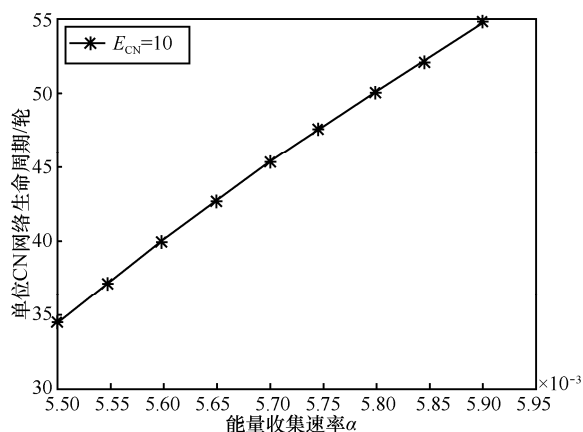


图 8 单位 CN 网络生命周期与能量收集速率对比

$\alpha = 0$ 时 CN 个数与节点能耗均衡性对比如图 9 所示。当 $\alpha = 0$ 时,即 CN 没有能量收集能力的节点时,通过调整 CN 的初始能量和数量也能够获得能耗均衡。其中,当 $E_{\text{CN}} = 25.5 \text{ J}$ 时,因为初始能量较低, CN 的生命周期一直小于 SN 的生命周期,也就是说,在这种情况下, CN 和 SN 能耗不均衡, CN 的网络生命周期取决于 CN 的初始能量。不同 CN 初始能量的网络生命周期($\alpha = 0$)如图 10 所示,随着 CN 初始能量的增加,网络生命周期递增。然而,单位节点所能提供的网络生命周期却急剧下降,因此可以认为,依靠增加 CN 的初始能量来提高网络生命周期效率很低,这意味着成本的上升,如图 11 所示。

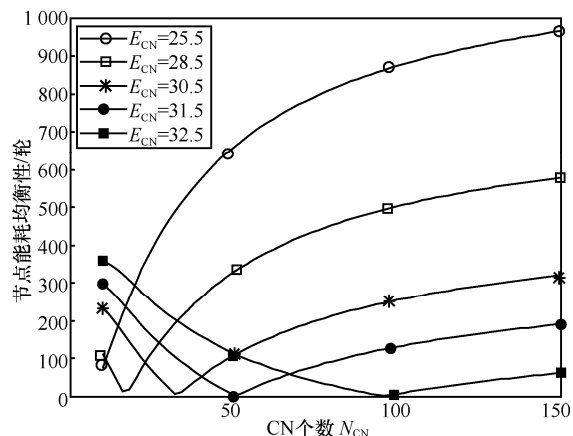
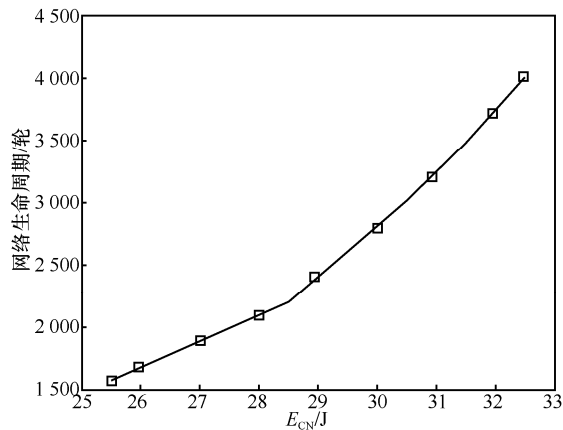
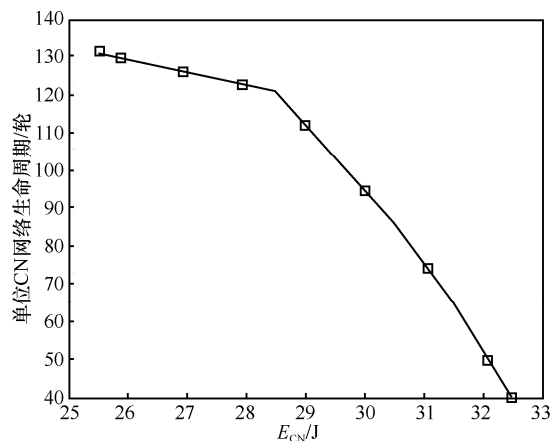


图 9 $\alpha = 0$ 时 CN 个数与节点能耗均衡性对比

图10 不同CN初始能量的网络生命周期 ($\alpha=0$)图11 不同CN初始能量的单位CN网络生命周期 ($\alpha=0$)

4.2 网络开销

与传统 WSN 和 CRSN 相比, HT-CRSN 中相邻 CN 间每轮/帧都需要交互信息才能正常工作。因此, 相对于传统 WSN 和 CRSN, HT-CRSN 开销较大, 并且随着 CN 数量的增加而增加。然而, 这些开销大部分是在执行 FBP 时所产生的, 也就是说, 这些开销大部分是在公共控制信道上所产生, 对后面利用探测出来的数据信道进行数据传输并没有影响。

4.3 平均时延及吞吐量

网络中的数据到达 sink 节点的时延主要由式 (16) 确定:

$$t_{\text{delay}} = t_{\text{sense}} + 2t_{\text{FBP}} + t_{\text{rece}} + t_{\text{FRP}} \quad (16)$$

其中, t_{sense} 为 CN 感知时间, t_{FBP} 为执行 FBP 所需时间, t_{rece} 为数据汇聚时间, t_{FRP} 为执行 FRP

所需平均时间。

t_{sense} 对于不同的 CN 来说是固定不变的 (具体时间取决于网络所能容忍的探测正确率), 而 t_{FBP} 随着 CN 数量的增加基本保持不变, t_{FRP} 因为中转次数增多而随着 CN 个数的增加而大幅增加, t_{rece} 因为随着 CN 数量增加每组数量减小而略微减小, 总体上, 平均时延随着 CN 数量增加而增加。因此, 在有时延要求的场景下, 有必要控制 CN 的数量。

HT-CRSN 的吞吐量取决于 CN 的数量和可用带宽。因为 CN 能够探测到多个信道用来传输数据, 并且本文中采用确定性的分配方式分配信道, 不存在竞争信道的问题, 假定信道带宽够用, 那么吞吐量就完全取决于网络中所能产生的数据分组个数即 CN 个数, CN 越多, 在一帧/轮时间内传输的数据也越多。然而, CN 越多, 时延越大, 部署成本也越高。一般而言, 在可以利用的信道带宽够用的情况下, 能耗均衡和部署成本是 HT-CRSN 部署的主要考虑对象。因此, 在 CN 能量收集能力一定的情况下, 部署网络时应该尽可能减小 CN 部署数量, 减小部署成本, 而同时又需要保证 CN 和 SN 间的能耗平衡, 尽可能地延长网络生命周期。

5 结束语

基于现有 CRSN 中认知功能带来的额外能耗和处理要求与传感器节点固有的资源约束的矛盾以及认知功能导致的 CRSN 高成本实现与其低成本实现要求的矛盾, 提出了一种基于认知功能和传感器节点相分离的 CRSN, 即 HT-CRSN, 并为这种新型网络设计了一个工作时序及其一系列可行性的 MAC 协议。基于所提网络以及协议, 通过仿真发现, 通过调整 CN 的能量收集速率或数量能够获得确定性的能耗平衡, 从而获得最大的能量利用率和网络生命周期。HT-CRSN 的部署比例应该重点考虑网络生



命周期和部署成本两项指标,一方面应该尽可能地减小部署成本,即减小 CN 的部署数量,另一方面又必须保证 CN 和 SN 间的能耗平衡,尽可能地延长网络生命周期。

参考文献:

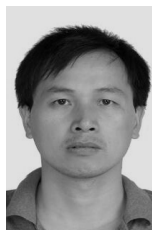
- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] CAVALCANTI D, DAS S, WANG J, et al. Cognitive radio based wireless sensor networks[C]//*International Conference on Computer Communications and Networks*, August 3-7, 2008, St. Thomas, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [3] AKAN O B, KARLI O B, ERGUL O, et al. Cognitive radio sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(5): 816-830.
- [4] KANSAL A, HSU J, ZAHEDI S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 2007, 6(4): 32.
- [5] SUDEVALAYAM S, KULKARNI P. Energy harvesting sensor nodes: survey and implications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(3): 443-461.
- [6] 冯剑, 王平阳, 王琳, 等. 基于能量获取的无线通信系统研究[J]. *电信科学*, 2015, 31(2): 124-131.
FENG J, WANG P Y, WANG L, et al. Research on energy harvesting communication system [J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(2): 124-131.
- [7] JAMAL A, THAM C K, WONG W C, et al. CR-WSN MAC: an energy efficient and spectrum aware MAC protocol for cognitive radio sensor network[C]//*2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, June 2-4, 2014, Oulu, Finland. New Jersey: IEEE Press, 2014: 67-72.
- [8] HUANG P, XIAO L, SOLTANI S, et al. The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: a survey[J]. *Communications Surveys & Tutorials IEEE*, 2013, 15(1): 101-120.
- [9] MIN J Y, CHUNG S H, HA Y, et al. An energy and latency aware WSN MAC protocol for bidirectional traffic in data collection[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015(12): 1-17.
- [10] SAVITA V J. Energy efficient MAC algorithm for WSN by varying transmitting and receiving power[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2016(10): 8043.
- [11] MOHAMMED I E, KWEH Y L, OTHMAN M, et al. A survey of routing MAC techniques for wireless sensor networks routing protocol[J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2015, 76(3): 322-332.
- [12] LAW Y W, PALANISWAMI M, HOESEL L V, et al. Energy-efficient link-layer jamming attacks against WSN MAC protocols[J]. *ACM Transactions on Sensors Networks*, 2009, 5(1): 1-38.
- [13] JANG B, LIM J B, SICHITIU M L, et al. An asynchronous scheduled MAC protocol for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(1): 85-98.
- [14] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H, et al. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//*The 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, January 4-7, 2000, Maui, Hawaii. New York: ACM Press, 2000: 8020.
- [15] SHAH G, AKAN O B. Performance analysis of CSMA-based opportunistic medium access protocol in cognitive radio sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013(15): 4-13.
- [16] HAWA M, DARABKH K A, AL-ZUBI R, et al. A self-learning MAC protocol for energy harvesting and spectrum access in cognitive radio sensor networks[J]. *Journal of Sensors*, 2016(16): 7-18.
- [17] LEE Y, KOO I. A distributed MAC protocol using virtual control channels for CRSN[J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 71(2): 1021-1048.
- [18] ZHOU G Y, HE C, JIANG L G. Single transceiver and network characteristics based MAC protocol for cognitive radio wireless sensor networks[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(11): 1729-1735.
- [19] SHAH G A, AKAN O B. Cognitive adaptive medium access control in cognitive radio sensor networks[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2015, 64(2): 757-767.
- [20] ELETREBY R M, ELSAYED H M, KHAIRY M M, et al. CogLEACH: a spectrum aware clustering protocol for cognitive radio sensor networks[C]//*2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, June 2-4, 2014, Oulu, Finland. New Jersey: IEEE Press, 2014: 179-184.
- [21] ANSARI J, ZHANG X, NEN P, et al. Spectrum agile medium access control protocol for wireless sensor networks[C]//*2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, June 21-25, 2010, Boston, MA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-9.
- [22] CHEN L, BIAN K, CHEN L, et al. A group-theoretic framework for rendezvous in heterogeneous cognitive radio networks[C]//*British Medical Association*, August 11-14, 2014, Philadelphia, PA, USA. New York: ACM Press, 2014: 165-174.
- [23] SALIM S, MOH S, CHOI D, et al. An energy-efficient and compact clustering scheme with temporary support nodes for cognitive radio sensor networks[J]. *Sensors*, 2014, 14(8): 14634-14653.
- [24] XIE R, YU F R, JI H, et al. Dynamic resource allocation for heterogeneous services in cognitive radio networks with imper-

- fect channel sensing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(2): 770-780.
- [25] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]//International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 3-5, 2004, Baltimore, MD, USA. New York: ACM Press, 2004: 95-107.
- [26] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D, et al. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//The 21st Conference on Computer Communications, June 23-27, 2002, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 2002: 1567-1576.
- [27] DAM T V, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 5-7, 2003, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 2003: 171-180.
- [28] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]//The 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, October 31-November 3, 2006, Boulder, CO, USA. New York: ACM Press, 2006: 307-320.
- [29] SUN W, YANG Z, ZHANG X, et al. Energy-efficient neighbor discovery in mobile Ad Hoc and wireless sensor networks: a survey[J]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2014, 16(3): 1448-1459.

[作者简介]



孟得月(1990-), 女, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络。



裴二荣(1976-), 男, 博士, 重庆邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为认知无线网络及 5G 通信。



黄佑林(1993-), 男, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络。