

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.03.006

认知无线电 IoT 中动态协作频谱感知和分割算法^①

李 越 颖

信阳农林学院 信息工程学院, 河南 信阳 464006

摘要: 针对认知无线电物联网(Cognitive Radio Internet of Things, CR-IoT)网络中传感器节点能耗大、频谱资源稀缺的问题, 本文提出一种动态协作频谱感知和分割(Dynamic Collaborative Spectrum Sensing and Splitting, DCSSS)算法. 该算法通过使用双向信息交换技术增强频谱感知时间, 并采用合并技术实现次级用户(Secondary User, SU)间的相互协作; 为降低低信噪比下的频谱感知时间, 采用频谱分割技术, 每个 SUs 在预定的时间对信道选择和路由做出决策. 实验结果表明, 相较于现存的机制, 本文所提算法具有更高的吞吐量、更少的能源消耗和更高的信道利用率.

关 键 词: 认知无线电物联网; 协作; 动态频谱感知; 动态频谱分割; 能源效率

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)03-0033-06

物联网(Internet of Things, IoT)是一个提供大量连接到智能设备和传感器的基于通信协议的网络^[1], 因为设备对有限的无线频谱的竞争, 物联网网络要求更多的频谱信道. 新兴认知无线电物联网(CR-IoT)网络是一个配备有认知无线电功能的专用 ad hoc 分布式物联网网络, 由大量空间分布的具有认知能力的自组织传感器节点组成, CR-IoT 网络通过提高受限无线电频谱资源, 在频谱受限的情况下最大化 IoT 网络的频谱信道利用率^[2-3]. 认知无线电(Cognitive Radio, CR)功能, 如信道感知和交换消耗了传感器节点大量的能量, 而传感器节点均由电池供电^[4]. 因此, 应仔细考虑如何进入机会频谱信道^[5], 最大化 CR-IoT 网络的能源效率.

近年来, 动态频谱接入技术, 如协同频谱共享(Cooperative Spectrum Sharing, CSS)和机会频谱共享(Opportunity spectrum sharing, OSS)已被证明能够提高 CR 网络能源效率和频谱效率. 文献[6]提出一种反对异步信道间频谱感知的具有前瞻性的跳频动态频谱访问方案, 减少主要用户(Primary User, PU)同频干扰, 以最大限度地降低通道切换持续时间开销, 提高 SU 的吞吐量. 文献[7]提出了一个鲁棒的优化协作频谱感知机制(Collaborative Spectrum Sensing Optimization, CSSO), 多用户可以合作以最小化信道感知时间. 文献[8]提出一种新型的基于能量探测的节能混合频谱感知方法, 改善了 CR 传感器的网络性能. 文献[9]提出了中继 OSS 方案, 提高能源效率和频谱效率. 在一个不完全信道状态信息场景下, 该方案可以有效地提高了无干扰 SU 的检测时间. 文献[10]针对 CR 网络中误报、漏检等不完善感知导致的不准确频谱切换问题, 提出了一种混合频谱切换方案, 能更好地实现 CR 网络中主用户和认知用户之间的频谱共享, 解决频谱稀缺问题. 针对物联网网络连接多种设备, 可用频谱不足, 频繁的设备连接故障, 以及高能量消耗问题, 文献[11]研究了 CR-IoT 网络, 从而提高了频谱管理效率. 为了有效优化物联网网络资源, 文献[12]提出 CR 和 IoT 用于连接设备的功率控制机制, 为工业自动化系统提供了一种经济有效的方法, 提高了协同频谱效率. 文献[13]提出了一种基于信道能量重构的动态压缩宽带频谱感知算法(Dynamic Compressive

① 收稿日期: 2020-02-03

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102210450).

作者简介: 李越颖, 硕士, 讲师, 主要从事计算机网络技术研究.

Spectrum Sensing Based on Channel Energy Reconstruction, DC SER), 降低了认知物联网网络能耗, 并证明了在高的不确定噪声情况下, 可以显著提升检测性能的概率, 同时减少误报概率。

现有的研究工作大多是综合研究如何优化 CR-IoT 网络的服务质量(Quality of Service, QoS)性能, 如减少传输范围和最大化网络容量等, 很少致力于提高 CR-IoT 网络的能效, 特别是频谱信道感知和转换的能耗。因此, 最大限度地减少频谱感知时间, 同时提高 CR-IoT 网络的数据吞吐量和能源效率十分必要。本文在研究现有认知无线电物联网频谱分配算法的基础上, 提出了一种动态协作频谱感知和分割(Dynamic Collaborative Spectrum Sensing and Splitting, DCSSS)算法, 最小化低信噪比下二级用户(SU)访问主用户(PU)空闲通道的频谱感知时间, 避免 SU 和 PU 之间干扰的同时, 最大化 CR-IoT 网络中的信道利用率, 降低了能耗。

1 研究背景

1.1 系统模型

在典型的物联网网络中, 考虑 CR 传感器节点均匀分布的集合。假设节点使用分层数据采集和分簇方法来定期探测其所在区域, 并向 sink 或者目的节点汇报。采集数据被分成两个步骤传输到 sink: 簇成员(Cluster Member, CM)节点通过时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)将数据直接发送到簇头(Cluster Head, CH); 簇头对感知到的数据进行汇总并基于 TDMA 方法直接转发到 sink。

假设有 m 个不同的数据授权信道 $L = \{L_1, \dots, L_m\}$, 使用带宽范围为 $B = \{B_1, \dots, B_m\}$ 。在 CR 网络中, SU 作为传感器节点来检测空闲的授权频谱, 并借机访问可用的 m 个信道进行数据发送。为了模拟 PU 产生的流量, 将数学函数设置为活动/被动固定随机过程, 其中活动表示 PU 占据信道, 被动意味着信道是可用的或者闲置的。用 W_m 和 K_m 表示指数随机变量, 分别具有统计平均值 w_m 和 k_m , 用来描述每个信道 L_m 的空闲时间和占用时间。由于恒定的信道衰落, 在频谱感知中存在不可避免的误差。假设 SU 具有相同的信道条件, 使用协同频谱感知技术来提高可用授权信道的检测精度。当 PU 不在场时, 信道可用; 当 PU 在场时, 就会被占用。频谱感知表现为二进制, 具有假设检验 H_1 和 H_0 。 P_a^m 表示活动信道被占用的概率, P_p^m 表示被动信道空闲的概率, 分别由下式得到

$$\begin{cases} P_a^m = k_m / (k_m + w_m), & H_{0,m} \\ P_p^m = w_m / (k_m + w_m), & H_{1,m} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $H_{1,m}$ 和 $H_{0,m}$ 分别表示可用授权信道被占用和空闲的假设。采用能量检测谱法确定空闲信道, 取输出功率的平均值, 并将其与预先设定的阈值进行比较, 判断 PU 在或者不在。假设 E_j 为能量检测因子, 不需要源节点的先验信息, 可感知占用周期 D_m 内可用的频谱信道。设 $P_{d_m,j}$ 表示正确检测占用信道概率, $P_{f_m,j}$ 表示确定信道是空闲的误报概率

$$P_{d_m,j} = \Pr(C_m \geq \delta_m \mid H_{0,m}) \quad (2)$$

$$P_{f_m,j} = \Pr(C_m \geq \delta_m \mid H_{1,m}) \quad (3)$$

其中, δ_m 表示检测阈值, C_m 表示 L_m 的统计假设检验。因此, 误检的概率为

$$P_{M_m,j} = \Pr(C_m < \delta_m \mid H_{1,m}) = 1 - P_{d_m,j} \quad (4)$$

为了提高 L_m 的 SU 占用周期, E_j 的检测概率为

$$P_{d_m,j} = Q\left[\left(\frac{\delta_m}{\sigma_m^2} - \bar{\gamma}_{m,j} - 1\right) \sqrt{\frac{\varphi f_s}{2\gamma_{m,j} + 1}}\right] \quad (5)$$

其中, φ 为感知周期, f_s 为采样频率, σ_m^2 为高斯噪声的方差, $\bar{\gamma}_{m,j}$ 为能量探测器 E_j 在信道上接收到的平均信噪比, $Q(\cdot)$ 为标准的高斯分布函数。为了提高 L_m 的 SU 占用周期, E_j 的误报概率为

$$P_{f_m,j} = Q\left[\left(\frac{\delta_m}{\sigma_m^2} - 1\right) \sqrt{\varphi f_s}\right] \quad (6)$$

为了提高信道感知精度, CR 传感器节点必须协同工作, CH 才能达到良好的频谱决策。假设有一组传感器节点 Z 被协作分配到感知频谱信道。估计感知频谱信道的协同检测概率 F_d^m 和协同错误警报概率 F_f^m 分别为

$$F_d^m = 1 - \prod_{N_j \in Z} (1 - P_{d_m, j}) \quad (7)$$

$$F_f^m = 1 - \prod_{N_j \in Z} (1 - P_{f_m, j}) \quad (8)$$

匹配协同误检概率 $F_M^m = 1 - F_d^m$. 为了实现频谱感知精度, 且避免来自 SU 的干扰, 设置预定义的 PU 阈值为 F_t . 因此, 定义约束传感器节点集 Z 的约束条件为

$$P_a^m F_M^m = P_a^m \cdot \prod_{N_j \in Z} (1 - P_{d_m, j}) \leq F_t \quad (9)$$

给定 E_j 的信号传输功率 P_j , 则通过 L_m 传输的高斯噪声功率为 σ_m^2 , 信道传输链路 j 与它的目的地传感器节点 i 之间的平均信道增益为 $h_{j, i, m}^2$, 根据香农信道容量得到传感器节点的传输速率为

$$R_{j, i, m} = B_m \log \left(1 + h_{i, j, m}^2 \frac{P_j}{\sigma_m^2} \right) \quad (10)$$

协同检测技术可以减少检测过程中由噪声引起的误差, 这可以有效节省带宽开销, 提高感知精度. CR 传感器节点通过中间节点随机传输数据到目的节点. 节点基于预定的路由度量决定发送包的路由. 节点使用路由如带宽、跳数、能量消耗等路由机制, 选择可靠的传输路由. 传输 1 bit 数据的任意链路 (i, j) 的 QoS 准则为

$$\Psi_{ij} = \frac{L_p P}{N R P_r(\alpha_{ij})} \quad (11)$$

其中, N 为数据包中 CR 传感器节点的个数, R 为传输速率, P 为源节点的传输功率, L_p 是数据包的长度, $P_r(\alpha_{ij})$ 是 SU 成功感知数据的概率, 与链路 α_{ij} 向目的地发送数据位得到的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 有关. 考虑到链路上每 bit 能耗, Ψ_{ij} 作为路由准则计算路由开销. 在传输通道中, 假设有 l 个节点索引, 其中 $l < N$, 允许多个 SU 通过不同的信道同时进行传输, 以避免同频干扰. SNR 测量了从源节点 i 到目的节点 j 的传输链路质量为

$$B_{i, j} = \frac{P G_{ij}}{\sum_{l=1, l \neq i}^N P_l G_{ij} f(l, j) + \sigma^2} \quad (12)$$

其中, G_{ij} 表示源节点 i 到目标节点 j 的链路增益, σ^2 表示收到的高斯噪声, 其中 $f(i, j)$ 为节点 i 和节点 j 之间的特征干扰函数 $f(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i, j \text{ 使用同一发射信道} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$.

分配给同频率信道的 CR 节点的传输功率会影响它们的链路质量. 假设 CR 节点调整传输功率提高链接质量, 允许其他 SU 使用相同的信道, 达到一个目标 SNR. 为了维护目标 SNR, 节点选择发送信道实现干扰最小化.

1.2 问题提出

考虑第 i 个 CR 传感器节点, 感知可用的授权信道. CR 传感器节点的能耗通常涉及动态频谱感知、切换数据传输和接收的能耗. 同时, CR 传感器节点的连接需要消耗大量的能量来连接无线电并转换至可用的信道. 基于传统的能量模型, 发送数据的能量消耗 E_i 可以表示为

$$E_i = (P + P_c) \cdot t_i \quad (13)$$

其中, P_c 是电路能耗, t_i 是数据传输时间.

电路能耗表示为

$$P_c = P_i + \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \cdot P \quad (14)$$

其中, P_i 表示传输能耗, 负责电路功耗, ϕ 表示功率放大器的效率, 其大小取决于射频功率放大器. 将式(14)代入式(13), 则数据传输的能耗为

$$E_i = \frac{1}{\phi} (P + P_i \phi) \cdot t_i \quad (15)$$

活动传感器节点 N 的总能耗 E_T 为

$$E_T = \sum_{i=1}^N E_i = \frac{1}{\phi} \sum_{i=1}^N (P + P_{\phi}) t_i \quad (16)$$

为了改进能耗, SU 使用频谱感知策略优化其感知时间. 多个 SU 采用协同感知技术来提高感知精度, 以增加传输吞吐量. 因此, 减少 SU 的感知时间可以最小化 CR-IoT 网络的能耗.

2 动态协作频谱感知和分割算法

本文提出一个能量有效的动态频谱感知和分割算法, 用于 SU 感知可用的授权信道. 假设:

- 1) SU 是均匀分布的.
- 2) SU 周期性地向邻居 SU 广播消息.
- 3) SU 生成连续的数据流并随机发送.
- 4) 基于路由机制, SU 选择了能耗较少的路由进行数据传输.

2.1 动态协作频谱感知

SU 充当 CR 传感器节点, 形成具有 CH 的簇. 在源和目标节点处, 信道的状态信息(Channel State Information, CSI) 被同时用于提高动态频谱系统中可靠的消息传输和高数据速率. 因此, SU 应用完美 CSI 可以在较低信噪比系统的信道感知中提供显著的增益. 每个带射频收发器的节点连接到至少一个 CH, 通过邻近的节点处理和广播数据到达目的地. 节点在传输范围内实现密集部署, 避免干扰和冲突. 多个 SU 协作感知授权信道的可用性, 同时降低感知时间, 最小化端到端数据传输引起的能量消耗.

在低信噪比的情况下, SU 检测信道频谱效率较低. 为了应对这一挑战, 提出一种双向信息交换的算法, 增强频谱感知时间. 该算法允许 SU 在 PU 间随机发送繁忙的信道音, 动态监听并找到一个空闲信道. 当 SU 想要发送数据, 算法工作如下: SU 通过控制信道发送随机请求消息. PU 识别随机请求消息并发送请求确认消息至 SU. SU 根据式(11) 选择每比特能量最高的授权信道, 并定期与邻居节点交换感知信息. 为保证数据传输的可靠性, SU 记录它发送的每个包并保存发送的包计时器. 此外, 该算法加强了 SU 间的信息交流与合作.

2.2 动态频谱分割算法

由于信道噪声不确定性和空间相关干扰的影响, 协作单元 SU 因为感知相同的信道频带会遇到同信道干扰. 为了提高抗干扰能力, 减少低信噪比时频谱感知时间, 本文提出一种动态频谱分割算法, 该算法中每个 SU 在信道选择和定时发送阶段做出决定, 保证传输吞吐量的需求. 首先构造一个二维图, 将信道划分为子信道, 以贪婪的方式最大化 SU 的局部感知. 假定在不同的 SNR 下, 参与的 SU 是独立且同分布的. 之后构造一个最小距离校验二元矩阵 $\mathbf{G}_0 \cdots \mathbf{G}_{k-1}$, 以增强在低信噪比情况下频谱感知的性能. 令 $p: \{1, \dots, v\} \rightarrow \{1, \dots, w\}$ 表示满射映射, 其中 $v \geq w$. 该算法保证了可变信道在每个边缘信道之间动态检测并连接新的信道. 因此, 信道分割之后边缘的数量得到了很好的维护, 每个边缘在连接的可变信道上持续冲突. 值得注意的是, 该频谱分割算法没有限制 SU 的操作在一个单一的频谱, 它能够自适应地最小化低信噪比下的干扰和频谱感知时间, 进一步增强了网络中的能源效率.

3 实验结果与分析

将本文算法与文献[7]中的 CSSO 进行比较, 由于多个 SU 协同减少感知时间, 提高了频谱效率; 和文献[13]的 DCSEr 比较, 在噪声不确定性下降低了能耗. 图 1 显示 SU 数量不同时, 随着 SU 占用信道数量的变化, 聚合 SU 吞吐量的变化.

从图 1 中可以看出, SU 占用的信道数量越多, 平均吞吐量越小, 因为信道数量增加最大化了信道干扰, 引起丢包率增加. 从单条曲线看出, 当 SU 捕获的信道数量增加时, 吞吐量稳步上升, 而到了某个时刻, 吞吐量就开始下降. 因为当被 SU 捕获的最优通道的值增加, 它使总吞吐量最大, 从而使可用的聚合带宽更大, 但另一方面被 SU 捕获的通道数量增加到一定值, 通过信道感知超时和重复确认丢失的数据包也随之增加, 又会降低 SU 的总吞吐量. 图 2 显示检测率性能随信噪比的变化情况.

如图 2 所示, 本文提出的 DCSSS 算法检测概率性能优于其他两种算法. 在低信噪比条件下, 信噪比指数增加, 协同检测概率越高, 对 PU 信道的保护越好. 此外, 当误报率高时, SU 不太可能访问已占用的 PU 信道, 因此 PU 信道内的干扰和冲突就会减少. 图 3 展示了权衡检测概率和误报概率的受试者工作特征 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线.

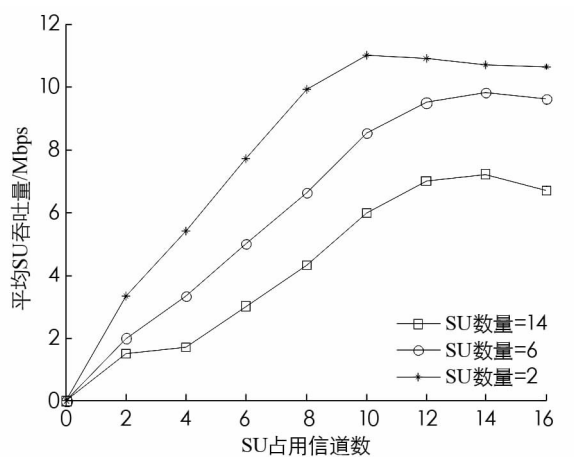


图 1 聚合 SU 吞吐量与 SU 占用的信道数量

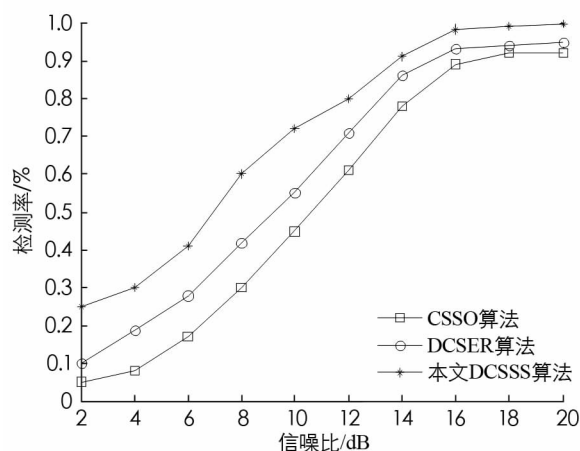


图 2 检测率性能与信噪比

从图 3 中看出, 本文算法具有较高的 PU 检测概率. 当存在噪声的可能性时, 本文所提出的算法误报率低, 误检性能好. 这证明了集群间数据传输的健壮性, 并可降低能耗. 当 SU 试图检测空间空闲信道时, 可以正确地检测可用和空闲的信道用于频谱感知, 实现高效信道利用率. 图 4 为不同丢包率下集群间数据传输的能耗.

从图 4 中看出, 能耗随着丢包率的增加而增加, 这是因为集群只依赖空闲的数据传输通道. 与 DCSER 和 CSSO 算法相比, 本文所提算法在数据传输中具有较低的能耗, 这是因为在空闲的授权信道, DCSSS 算法可以传输数据进行信道感知和切换, 最小化了能耗. DCSER 和 CSSO 算法消耗较高能量主要是由其较高的信道干扰比率及频繁的包端到端传输延迟所致.

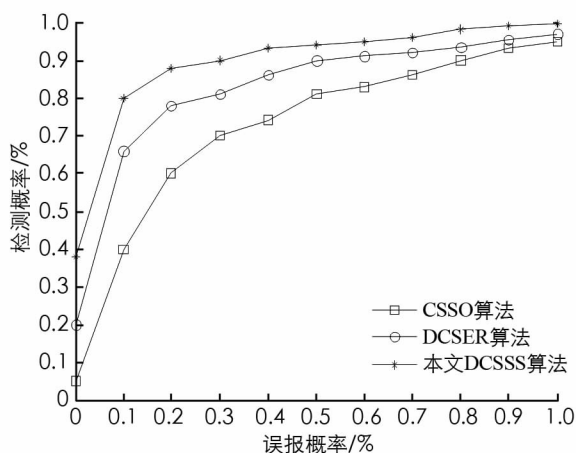


图 3 信道噪声不确定情况下的 ROC 曲线

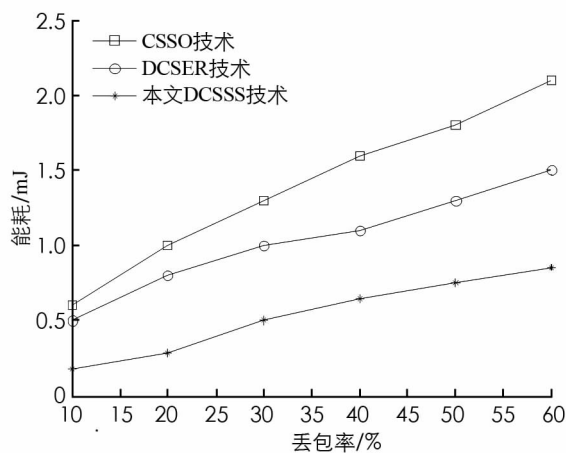


图 4 不同丢包率下的数据传输能耗

4 结 语

本文研究了动态频谱感知技术, 最大限度地降低分簇 CR-IoT 网络中传感器节点的能耗. 提出了双向信息交换顺序算法, 在数据传输中实现可靠的节能动态频谱感知技术, 达到最佳的能源效率. 实验结果表明, 本文算法可以最大限度地降低在数据传输中传感器节点的能耗, 达到较高的吞吐量. 未来, 我们将研究可重复充电的 CR-IoT 网络, 使能源效率可以得到进一步改善.

参考文献:

- [1] LI S C, DA X L, ZHAO S S. 5G Internet of Things: aSurvey [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10: 1-9.
- [2] KHAN A A, REHMANI M H, RACHEDI A. Cognitive-Radio-Based Internet of Things: Applications, Architectures, Spectrum Related Functionalities, and Future Research Directions [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(3): 17-25.
- [3] AWIN F A, ALGINAHI Y M, ABDEL-RAHEEM E, et al. Technical Issues on Cognitive Radio-Based Internet of Things Systems: aSurvey [J]. IEEE Access, 2019, 7: 97887-97908.
- [4] ASLAM S, EJAZ W, IBNKAHLA M. Energy and Spectral Efficient Cognitive Radio Sensor Networks for Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4): 3220-3233.
- [5] HU F, CHEN B, ZHU K. Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: a Survey [J]. IEEE Access, 2018, 6: 15754-15776.
- [6] AYKIN I, KRUNZ M, XIAO Y. Adaptive Frequency-Hopping Schemes for CR-Based Multi-Link Satellite Networks [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2018, 36(4): 315-331.
- [7] LIZ T, CHANG B M, WANG S G, et al. Dynamic Compressive Wide-Band Spectrum Sensing Based on Channel Energy Reconstruction in Cognitive Internet of Things [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2598-2607.
- [8] WANG C, SONGT C, WU J, et al. Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing for Hybrid Spectrum Sharing Cognitive Radio Networks [C]//2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Barcelona: IEEE, 2018.
- [9] ALHAMAD R, BOUJEMAA H. Cooperative Spectrum Sensing with Relay Selection [J]. Telecommunication Systems, 2018, 68(4): 631-642.
- [10] PENG J W, HAN Z R, TAO K, et al. Hybrid Spectrum Handoff Scheme of Imperfect Sensing in Cognitive Radio Networks [J]. Recent Patents on Engineering, 2019, 13(4): 364-373.
- [11] WANG X, EKIN S, SERPEDIN E. Joint Spectrum Sensing and Resource Allocation in Multi-Band-Multi-User Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(8): 3281-3293.
- [12] SHAGHLUF N, GULLIVER T A. Spectrum and Energy Efficiency of Cooperative Spectrum Prediction in Cognitive Radio Networks [J]. Wireless Networks, 2019, 25(6): 3265-3274.
- [13] ANSERE J A, HAN G J, WANG H, et al. A Reliable Energy Efficient Dynamic Spectrum Sensing for Cognitive Radio IoT Networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6748-6759.

Dynamic Collaborative Spectrum Sensing and Splitting Algorithms in Cognitive Radio Internet of Things Network

LI Yue-ying

College of Information Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang Henan 464006, China

Abstract: Aiming at the problem of high energy consumption and scarce Spectrum resources of sensor nodes in the cognitive radio Internet of things(CR-IoT) network, a Dynamic Collaborative Spectrum Sensing and Splitting (DCSSS) algorithm has beenproposed. In this algorithm,two-way information exchange technology is usedto enhance spectrum sensing time, and merge technology adoptedto realize mutual cooperation between Secondary Users (SUs). In order to reduce the spectral sensing time at low SNR, spectrum splitting technology is adopted, and each SU makes decisions on channel selection and routing at pre-determined time. Experimental results show that the proposed algorithm has higher throughput, lower energy consumption and better channel utilization compared with the existing mechanism.

Key words: CR-IoT; collaboration; dynamic spectrum sensing; dynamic spectrum splitting; energy efficiency

责任编辑 夏 娟