

新型认知无线传感器网络的吞吐量分析*

许 驰^{1,2,3}, 郑 萌^{1,2}, 梁 炜^{1,2}, 于海斌^{1,2}

¹(中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

²(中国科学院 网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

³(中国科学院大学, 北京 100049)

通讯作者: 于海斌, E-mail: yhb@sia.cn

摘要: 为了实现认知无线传感器网络(CRSN)在授权频段的连续可靠通信,结合协作感知和宽带感知策略,提出了一种新型 CRSN 架构.通过在网络中部署专门负责频谱感知的认知节点,将频谱感知与数据传输功能进行了合理分配.在最大化感知和传输时间的同时,实现了频谱的实时感知和数据的连续传输,进而提高了频谱检测率和网络吞吐量.同时,由认知节点协作对宽带进行多信道联合检测,除了可以提高检测的可靠性,还有利于实现 CRSN 对授权频段的连续接入,进一步保证网络数据传输的连续性.通过仿真对不同硬融合准则下的平均网络吞吐量进行了分析和比较,结果表明该网络架构可以获得更高的吞吐量.

关键词: 认知无线传感器网络;能量检测;多信道联合检测;宽带感知;协作频谱感知;吞吐量

中文引用格式: 许驰,郑萌,梁炜,于海斌.新型认知无线传感器网络的吞吐量分析.软件学报,2014,25(Suppl.(1)):47-55.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14006.htm>

英文引用格式: Xu C, Zheng M, Liang W, Yu HB. Throughput analysis of a novel cognitive radio sensor network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 47-55 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14006.htm>

Throughput Analysis of a Novel Cognitive Radio Sensor Network

XU Chi^{1,2,3}, ZHENG Meng^{1,2}, LIANG Wei^{1,2}, YU Hai-Bin^{1,2}

¹(Shenyang Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

²(Key Laboratory of Networked Control Systems, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

³(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Corresponding author: YU Hai-Bin, E-mail: yhb@sia.cn

Abstract: Aiming to accomplish continuous and reliable communication of cognitive radio sensor network (CRSN) in the licensed band, this paper proposes a novel CRSN architecture by combining the strategies of cooperative sensing and wideband sensing. Through deploying cognitive nodes that are especially responsible for spectrum sensing in the network, spectrum sensing and data transmission are reasonably separated. While maximizing the duration of sensing and transmission, the scheme also achieves real-time spectrum sensing and continuous data transmission, significantly improving the probability of detection and network throughput. In addition, the design organizes the cognitive nodes to cooperatively perform multi-channel joint detection on the wideband. In this way, besides improving the detection reliability, the CRSN can continuously access the licensed band to further ensure that the data transmission is successive. The average network throughput under different hard fusion rules is analyzed and compared through simulations. Results show that the proposed network architecture can achieve higher throughput.

Key words: cognitive radio sensor network; energy detection; multi-channel joint detection; wideband sensing; cooperative spectrum sensing; throughput

* 基金项目: 国家自然科学基金(61233007, 61304263); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA06021000); 辽宁省自然科学基金(2014020081)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

随着无线网络技术的快速发展和大规模应用,越来越多的无线网络正部署在我们的周围.然而,由于频谱分配的固定性,目前大量的无线网络均工作于免授权的 ISM 频段,导致了这一频段的过度拥挤.仅以 ISM 2.4GHz 频段为例,就有商业应用的 ZigBee、Bluetooth 和 Wi-Fi 以及工业应用的 WirelessHART、ISA100.11a 和 WIA-PA 等网络^[1,2].当这些网络部署于相同区域时,存在相互干扰,严重降低通信的可靠性.因此,无线网络的层出不穷和 ISM 频段的信道拥挤为低成本、低功耗的无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)^[1-3]提出了新的挑战.解决信道拥挤问题的现有方法主要包括协调、竞争、跳频和功率控制等,但是这些方法仍然是在本已拥挤的 ISM 频段进行的,并没有从根本上解决频谱稀缺的问题.实际上,授权频段的频谱利用率并不高,仅在 15%~85%^[4].认知无线电(cognitive radio,简称 CR)^[4,5]为解决频谱稀缺问题提供了有效方法,它通过周期性的频谱感知,可以允许次级用户(secondary user,简称 SU)在不影响主用户(primary user,简称 PU)的情况下接入授权频段进行通信.基于这一思想,将 CR 应用于 WSN 形成具有频谱感知能力的认知无线传感器网络(cognitive radio sensor network,简称 CRSN)^[6-9]是解决 WSN 在 ISM 频段信道拥挤问题的可行方案.随着无线传感器网络和认知无线电技术的相继成熟,由两者所形成的交叉学科必然成为新兴的研究热点.

CRSN 具有很多 WSN 所不具备的特点,包括动态频谱接入,突发性通信的机会信道使用,自适应降低功耗以及多网共存等^[6].现有的关于 CRSN 的研究主要集中于信道管理^[7]、能效^[7-11]、分簇管理^[11,12]等,但是对于 CRSN 的基本架构尚无广泛接受的定义.文献[10]提出了一种传感器网络辅助感知的认知无线网络(cognitive radio network,简称 CRN),并采用贪婪算法讨论了网络的调度问题,有效提高了网络能效.文献[11]提出一种两层架构的 CRSN,将传感器网络和认知网络进行了重叠部署,但是这种叠加仍不可避免地存在网间相互干扰.文献[13]提出了一种分簇结构的传感器网络与认知网络的混合网络,并在其中应用了能量检测和特征值检测的两级频谱感知方法,有效提高了感知的准确性,但是其计算复杂度较高.文献[14]基于机会频谱接入策略提出了一种内网计算方法,可以减少不必要的通信,同时容纳更多的并发传输,进而提高频谱效率.但是,上述研究仍然是基于 CRN 架构及其机会频谱接入策略,对于传感器网络的低成本、低功耗、多跳和短距离传输等特性考虑甚少.

实际上,认知无线传感器网络的发展并不能完全采用认知无线网络的思想进行.首先,CRN 通常是采用大功率基站的集中式网络(如 IEEE 802.22),而传感器网络则为低功率的多跳分布式网络.其次,CRN 的 SU 均需配备认知无线电收发机,而如果在大规模的传感器网络中均配置该装置,将大幅增加设备成本和网络能耗.第三,现有的 CRN 均采用机会频谱接入策略,即当 PU 正在占用或将重新占用授权频段时,SU 不得接入或必须终止接入,这就造成了频谱接入的不连续.最后,CRN 普遍采用图 1 所示的时隙结构.即 SU 首先在时隙 τ 内进行频谱感知,然后根据感知结果选择是否在剩余的 $T-\tau$ 时隙内进行数据传输.这种传输机制实际上是一种周期感知与传输的不连续策略,存在一个感知与传输的折衷问题^[15].而对于传感器网络来说,这种间断性的数据传输方式并不适用.特别是对于一些实时性应用来说,根本无法接受不连续的数据传输策略.因此,完全基于 CRN 架构进行 CRSN 的研究无法解决传感器网络的相关问题.

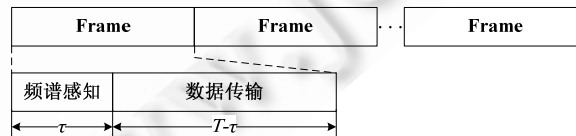


图 1 认知无线网络帧结构

基于上述讨论,本文提出了一种认知无线传感器网络架构.在不改变多跳分布式传感器网络结构的基础上,在网络中部署专门负责频谱感知的认知节点.认知节点采用多信道联合检测的方法对授权的宽带频段进行协作频谱感知,并将感知结果上报给协调器进行融合处理.协调器根据硬融合结果调度传感节点在可靠信道进行数据传输.这样,将频谱感知与数据传输功能进行了合理地划分,既可以实现对授权频段的实时检测,又可以实现数据的连续性传输.在提高了检测可靠性的同时,也增大了网络吞吐量.此外,由于无需全网节点增加认知无线电设备,也可以降低设备成本和网络能耗.为了验证新的网络架构的合理性,对协作感知的可靠性和网络的吞吐量进行了计算和分析.结果表明,新的网络架构可以有效提高网络的吞吐量.综上所述,本文的主要贡献

是:(1) 提出了适合于传感器网络的 CRSN 新架构,通过单独部署认知节点,可以保持传感器网络的分布式多跳特性,降低设备成本和网络能耗;(2) 采用宽带感知和协作感知有利于实现 CRSN 对授权频段的连续性可靠接入;(3) 提出了新的感知和传输帧结构,可以实现实时的频谱感知和连续的数据传输.

本文第 1 节给出新的认知无线传感器网络架构及其多信道联合检测策略.第 2 节阐述认知节点的协作频谱感知策略.第 3 节对新的网络架构下的吞吐量进行计算.第 4 节对不同网络架构下采用不同硬融合准则所获得的网络吞吐量进行仿真和对比分析.最后,第 5 节对本文进行总结.

1 认知无线传感器网络模型

认知无线传感器网络的基本模型如图 2 所示,包含协调器、传感节点和认知节点等 3 类节点.其中传感节点的基本结构与 WSN 节点相同,仍执行传感器和/或执行器功能.认知节点负责对授权频段进行频谱感知,均配置有认知无线电收发机.认知节点的部署密度可以根据检测可靠性要求进行灵活调整.一般来说,对于大规模的 CRSN,认知节点的部署密度要小于传感节点.这样,由于无需全网节点配置感知模块,相应地就减少了设备成本和网络能耗.协调器则既要作为汇聚节点对传感节点进行控制和管理,又要执行融合中心的功能对认知节点感知的信道信息进行融合处理.这样,协调器根据认知节点的感知结果调度传感节点接入到授权频段的可用信道进行数据传输,可以有效避免 ISM 频段的干扰,提高授权频段的频谱利用率.

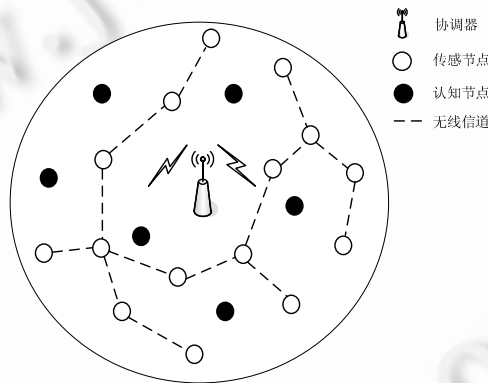


图 2 认知无线传感器网络模型

认知节点均配置有认知无线电收发机,可以通过其前端的宽带天线扫描授权的宽带频段.进行宽带频谱感知除了因为目前开放的授权频段均为宽带频段(如 VHF 和 UHF 频段)外,更重要的意义在于它有利于实现传感器网络对授权频段的连续接入.由于 PU 通常不占用整个宽带并且占用具有动态性,所以当工作于窄带的传感器网络接入到宽带后,可以动态选择未被占用的信道以实现其连续接入.具体来说,这里采用多信道联合检测^[16]策略,其基本结构如图 3 所示.将宽带频段划分为 M 个相同带宽且互不重叠的窄带信道,然后在每个信道并行执行频谱检测.宽带信号首先下变频至中心频率为 f_m ($m=1, \dots, M$) 的窄带信道 m 后,得到每个信道上的初始接收信号 X_m .

$$X_m = h_p \cdot s_m + h_s \cdot s + n_m \tag{1}$$

其中, s_m 和 s 分别是信道 m 上的 PU 信号和传感节点信号.假设 s_m 和 s 相互独立,且 s_m 服从零均值的高斯分布. h_p 和 h_s 分别表示 PU 到认知节点和传感节点到认知节点的信道增益. n_m 表示加性高斯白噪声信号,服从均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯分布,即 $n_m \sim N(0, \sigma_n^2)$.

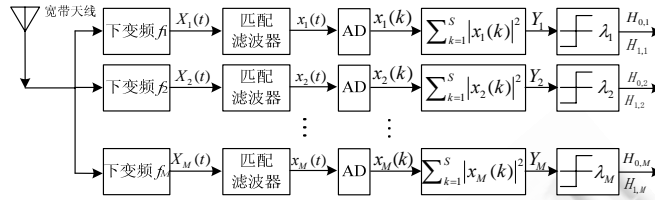


图3 认知节点结构

信道 m 的初始接收信号 X_m 首先通过匹配滤波器滤除掉正在传输的传感节点信号.由于传感器网络都是面向应用的,传感器信号(如温湿度、压力等信号)特征均已知,所以可以通过匹配滤波器有效滤除.这样,剩余的信号可以表示为

$$x_m = h_p \cdot s_m + n_m \quad (2)$$

然后,该信号经 AD 转换,可以获得每个信道上的信号采样值 $x_m(k)$.采用多信道联合检测的优势就在于它可以有效避免对整个宽带频段采样时所需的高采样率,易于实现.基于式(2),针对每个信道建立其是否被 PU 占用的二元假设检验模型:

$$x_m(k) = \begin{cases} n_m(k), & H_{0,m}, \\ h_p(k) \cdot s_m(k) + n_m(k), & H_{1,m}, \end{cases} \quad m = 1, \dots, M \quad (3)$$

其中, $H_{0,m}$ 和 $H_{1,m}$ 分别表示 PU 未占用和占用信道 m .

基于该假设检验模型,信道 m 上的采样信号进入能量检测器进行频谱感知.能量检测具有设备简单,计算复杂度低且无需 PU 先验信息的特点,因此是 CRSN 的最佳选项.假设信道 m 的带宽为 W ,并采用 Nyquist 采样速率 $f_s = 2W$.在感知时隙 τ 内,获得的采样数为 $S = 2\tau W$.如图3所示,信道 m 的能量输出值为 $Y_m = \sum_{k=1}^S |x_m(k)|^2$.该能量值服从自由度为 S 的卡方分布,即 $Y_m \sim \chi_S^2$.当采样数足够大时,通过中心极限定理可以将该卡方分布近似为高斯分布.因此,能量检测器在单个信道 m 上的误警率和检测率分别为^[17]

$$P_f^{(m)} = \Pr(Y_m > \lambda_m | H_{0,m}) = Q\left(\frac{\lambda_m - 2\tau W \sigma_n^2}{\sqrt{4\tau W \sigma_n^4}}\right) \quad (4)$$

$$P_d^{(m)} = \Pr(Y_m > \lambda_m | H_{1,m}) = Q\left(\frac{\lambda_m - 2\tau W \sigma_n^2(1 + \gamma)}{\sqrt{4\tau W \sigma_n^4(1 + \gamma)^2}}\right) \quad (5)$$

其中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 表示标准正态分布的右尾概率函数. γ 表示 PU 到认知节点链路上的实时信噪比. λ_m

是信道 m 上预定义的能量检测阈值,但是这里假设各信道上的能量检测阈值均相同,即 $\lambda_1 = \dots = \lambda_M = \lambda$.

从式(4)和式(5)可以看出认知节点的检测性能(包括误警率和检测率)与 λ, γ, W 和 τ 密切相关.显然,感知时隙 τ 越长,频谱检测的准确性越高,对 PU 的保护越好.但是,根据图1所示的帧结构,感知时隙越长,数据传输的时隙越短,因此两者存在折衷问题^[15].此外,如果在传感器网络中应用这种帧结构,仍然存在数据传输的不连续问题.因此新的网络架构下,本文进一步提出一种新的帧结构确保 CRSN 数据传输的连续性,如图4所示.由于频谱感知和数据传输功能已经分别交由认知节点和传感节点完成,故认知节点和传感节点可以占用帧的全部时隙完成各自的功能,也就实现了感知时隙与传输时隙的最大化.这样,认知节点可以实现对授权频段的实时检测,提高频谱检测性能和对 PU 的保护.同时,传感节点可以进行连续的数据传输,实现网络吞吐量的最大化.

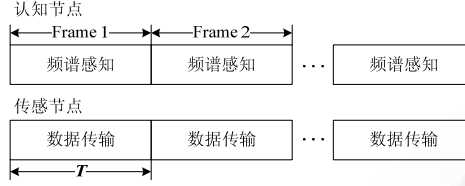


图 4 认知节点和传感节点的帧结构

2 认知节点的协作频谱感知

单个认知节点进行频谱感知的过程中,不可避免地会遇到多径衰落、阴影和隐藏终端等问题^[18-20].因此,仅靠单个节点的频谱感知不能保证检测的可靠性,也就不能充分保护 PU.而协作频谱感知通过探索频谱的空间分集特性,可以有效地解决单个认知节点检测率低的问题.因此,在新的网络架构下,本文进一步在认知节点间引入协作频谱感知策略来提高频谱检测的准确性,并考察其对网络吞吐量的影响.

在认知节点完成对本地多信道的联合检测后,需要将感知结果汇聚给协调器.假设网络中设置有 N 个认知节点,并用 $Y_m(n)$ 表示认知节点 n 对信道 m 的检测结果.这样, N 个认知节点对 M 个信道的检测结果可以用如下矩阵简单表示为

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1 \mathbf{Y}_2 \dots \mathbf{Y}_M]$$

$$= \begin{bmatrix} Y_1(1) & Y_2(1) & \dots & Y_M(1) \\ Y_1(2) & Y_2(2) & \dots & Y_M(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_1(N) & Y_2(N) & \dots & Y_M(N) \end{bmatrix},$$

其中,假设各认知节点处的信噪比均相同,即 $\gamma_1 = \dots = \gamma_N = \gamma$.这一假设的合理性就在于 CRSN 具有短距离传输的特性,因此 PU 到各节点的衰落可以视为相同.

当协调器获得了各认知节点上传的感知数据后,将对数据进行融合处理.融合的方法主要包括软融合和硬融合.其中软融合需要认知节点上传全部感知数据,网络开销比较大,并不适合传感器网络.而硬融合仅需要发送 1bit 的局部判决结果即可,将减小了网络开销.此外,已经有研究表明以计算量的增加换取通信量的减少是比较适合传感器网络的策略,而且在一些实际应用中,硬融合的性能并不比软融合差^[18].因此,这里对认知节点的感知数据进行硬融合处理.认知节点首先对本地的感知结果按图 3 所示的阈值比较器进行局部决策.

$$D_m(n) = \begin{cases} 0, & Y_m(n) < \lambda \\ 1, & Y_m(n) \geq \lambda \end{cases} \quad m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N \quad (6)$$

其中, $D_m(n)$ 表示认知节点 n 对信道 m 的本地决策结果.然后,协作的认知节点将多信道的本地决策结果发送给协调器,由协调器对其进行融合 $D_m^{all} = \sum_{n=1}^N D_m(n)$.这样,协调器将获得协作的认知节点对 M 个独立信道的感知结果 $\mathbf{D} = [D_1^{all} \ D_2^{all} \ \dots \ D_M^{all}]$.根据全局结果 \mathbf{D} ,协调器采用 K -out-of- N 准则进行硬融合.对于信道 m 来说,当至少有 K 个认知节点判定 PU 存在时,即 $D_m^{all} \geq K$ 时,认为该信道已被 PU 占用.否则,信道未被占用,CRSN 可以接入.特别地,当 $K=1, K=N$ 和 $K=N/2$ 时,分别称为 OR, AND 和 Majority 准则.其中,OR 准则为多数 CRN 所采用.基于 K -out-of- N 准则,可以计算单个信道 m 的协作感知误警率和检测率^[19,20]:

$$Q_f^{(m)} = \Pr(D_m^{all} > K | H_{0,m}) = \sum_{j=K}^N \binom{N}{j} (P_f^{(m)})^j (1 - P_f^{(m)})^{N-j}, \quad m = 1, \dots, M \quad (7)$$

$$Q_d^{(m)} = \Pr(D_m^{all} > K | H_{1,m}) = \sum_{j=K}^N \binom{N}{j} (P_d^{(m)})^j (1 - P_d^{(m)})^{N-j}, \quad m = 1, \dots, M \quad (8)$$

其中 $P_f^{(m)}$ 和 $P_d^{(m)}$ 分别由式(4)和式(5)给出.

在协调器完成硬融合之后,将获得 M 个信道的全局判决结果.基于该判决结果,协调器可以决定 CRSN 是否

可以接入宽带的授权频段.当整个宽带有多个窄带信道可供选择时,协调器可以选择一个状态最佳的窄带信道进行通信.而当某个窄带信道重新被 PU 占用时,又可以调度网络节点切换到其他可用的窄带信道进行通信.这就保证了 CRSN 对授权频段的连续性接入.当然,CRSN 的信道选择和切换,以及协调器对认知节点和传感节点的传输调度都是通过 MAC 层协议完成的,并非本文重点,将留作下一步研究工作.

3 CRSN 的吞吐量

为了评价新的认知无线传感器网络架构的合理性,本节着重从网络吞吐量的角度进行分析.由于 CRSN 接入授权频段的性能是由 PU 的状态和频谱感知的结果决定的,所以在分析 CRSN 的吞吐量时,要分两种情况进行考虑.

情况 1.协作的认知节点准确地检测到 PU 未占用信道,使得传感节点可以在授权频段进行数据传输.此时,信道容量可以表示为 $C_0 = \log_2(1 + SNR_s)$.其中, $SNR_s = \frac{P_s}{N_0}$ 表示传感节点的输出信噪比. P_s 表示传感节点的发射功率, N_0 表示噪声功率.

情况 2.在 PU 占用信道的情况下,协作的认知节点错误地判决 PU 不存在,即协作的认知节点出现漏警.这样,导致 CRSN 在已被 PU 占用的授权频段进行数据传输,并对 PU 产生干扰.在这种情况下,从 CRSN 的角度来看,PU 信号将被视为对传感节点的干扰.因此,传感节点的信噪比为 $S\tilde{N}R_s = \frac{P_s}{P_p + N_0} = \frac{SNR_s}{SNR_p + 1}$,其中, P_p 表示传感节点所接收到的 PU 信号功率.此时,信道的容量可以表示为 $C_1 = \log_2(1 + S\tilde{N}R_s) = \log_2\left(1 + \frac{SNR_s}{SNR_p + 1}\right)$.

根据频谱检测的结果,CRSN 在信道 m 可以获得的吞吐量分别为

$$R_0^{(m)} = (1 - Q_f^{(m)})P(H_0)C_0 \quad (9)$$

$$R_1^{(m)} = (1 - Q_d^{(m)})P(H_1)C_1 \quad (10)$$

其中, $Q_f^{(m)}$ 和 $Q_d^{(m)}$ 分别由式(7)和式(8)给出. $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 分别是 PU 不存在与存在的概率.显然,式(9)和式(10)式是基于最大后验概率(MAP)建立的检验问题,它充分考虑了 PU 的状态信息.具体来说,将 PU 的状态变化建模为 ON-OFF 过程,其中 ON 表示 PU 存在,OFF 表示 PU 不存在.进一步假设 PU 的到达情况服从 Poission 过程,并且 PU 在不同时刻的到达情况是相互独立的,那么 PU 在 ON 和 OFF 状态的持续时间服从指数分布.其中,在 ON 和 OFF 状态下,指数分布的均值分别为 α_1 和 α_0 .这样,可以计算 PU 处于 ON 和 OFF 状态的概率,分别为

$$P(H_1) = \frac{\alpha_1}{\alpha_0 + \alpha_1} \text{ 和 } P(H_0) = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_1}. \text{ 因此,CRSN 在信道 } m \text{ 可以获得的平均吞吐量为}$$

$$R^{(m)} = R_0^{(m)} + R_1^{(m)} = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_1}(1 - Q_f^{(m)})C_0 + \frac{\alpha_1}{\alpha_0 + \alpha_1}(1 - Q_d^{(m)})C_1 \quad (11)$$

4 性能分析

本节通过仿真实验对新的 CRSN 架构在不同硬融合准则下的网络吞吐量进行对比分析与评价.相关的仿真参数设置如下:CRSN 中的认知节点数量 $N=50$,可以满足大规模传感器网络的应用.单个独立的窄带信道宽度为 $W=3\text{MHz}$.根据 Nyquist 定理,采样频率 $f_s=6\text{MHz}$.一个帧的长度为 $T=100\text{ms}$.PU 处于 ON 和 OFF 的平均时间分别为 $\alpha_1=352\text{ms}$ 和 $\alpha_0=650\text{ms}$,因此计算可得 $P(H_1)=0.35$ 和 $P(H_0)=0.65$,即 PU 的信道占用率为 35%.传感节点的信噪比假设为 $SNR_s=20\text{dB}$.

为了衡量新的网络架构的优势,这里首先对采用不同感知时长的传统网络架构进行仿真.其中,传统网络架构所采用帧结构如图 1 所示.根据文献[15],并在其中应用协作频谱感知策略,传统架构下的网络吞吐量为

$$\hat{R}^{(m)} = \frac{T - \tau}{T} [(1 - Q_f^{(m)})P(H_0)C_0 + (1 - Q_d^{(m)})P(H_1)C_1] \quad (12)$$

图 5 给出了在传统网络架构下采用不同的硬融合准则时,感知时隙长度对网络吞吐量的影响.可以看出,3种融合准则下的吞吐量曲线均为凸函数曲线,即存在一个最佳的感知时长可以使 CRSN 获得最大的网络吞吐量.当感知时间超过最佳的感知时间点时,网络吞吐量将会下降.这是因为,感知时间的增加将会减小数据传输的时间,造成网络吞吐量的下降.这一情况正是传统网络架构的帧结构所固有的感知与传输的折衷问题.关于协作频谱感知策略下吞吐量曲线的凸函数特性证明与文献[15]相似,这里不再赘述.除了传统网络架构下的网络吞吐量曲线,图 5 还给出了新网络架构下的吞吐量曲线,这时,感知时长和数据传输时长均固定为帧的最大长度 $T=100\text{ms}$.因此,吞吐量性能稳定,并无传统架构下的感知与传输的折衷问题.显然,在同一硬融合准则下,新的网络架构所获得吞吐量要大于传统的网络架构.原因主要有两方面:一方面感知时长的增大提升了 CRSN 的检测性能,进而提高了频谱利用率;另一方面,传输时长扩大了,吞吐量相应地就增大了.

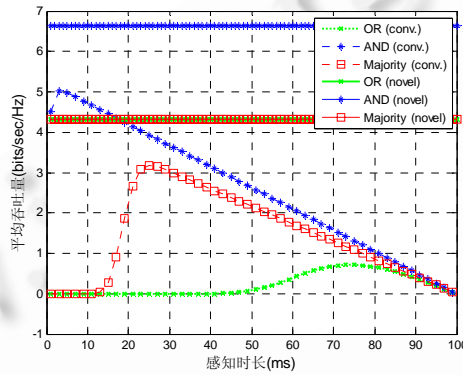


图 5 平均吞吐量与感知时长关系

图 6 给出了在不同硬融合准则下,网络可获得的平均吞吐量与认知节点数量的关系.显然,在 AND 准则下获得的吞吐量要好于 OR 准则和 Majority 准则.其中,在 AND 准则下,网络吞吐量是随认知节点数量的增大而增大的,而 OR 准则和 Majority 准则下的吞吐量相对稳定.这是因为,由 OR 准则和 Majority 准则所获得的检测性能相对稳定,所以吞吐量也相对稳定.而 AND 准则要求全网认知节点达成一致,其检测性能受认知节点数量的影响较大,因此其吞吐量随认知节点数量的增大而增大.

图 7 给出了不同硬融合准则下,网络可获得的平均吞吐量与 PU 的信噪比 SNR_p 之间的曲线关系.可以看到,AND 准则下的吞吐量仍好于 OR 准则和 Majority 准则.在 AND 准则下,随着 SNR_p 的增大,吞吐量是下降的.特别是当 $SNR_p > 0$ 以后,吞吐量加速下降.这是因为 SNR_p 的增大意味着 PU 越来越接近 CRSN 或者 PU 增大了发射功率.相应地,PU 对 CRSN 的影响也就增大了,造成了 CRSN 吞吐量的下降.而 OR 准则和 Majority 准则的检测性能相对稳定,因此这两种准则下的吞吐量相对稳定.对 CRSN 来说,采用 AND 准则显然要好于 OR 准则和 Majority 准则,是获得较大吞吐量的可行选项.但是这一选择完全是从最大化 CRSN 自身增益的角度考虑,所以对 PU 的保护就相对有限.当 PU 需要严格的保护时,OR 准则和 Majority 准则仍是最佳选项.

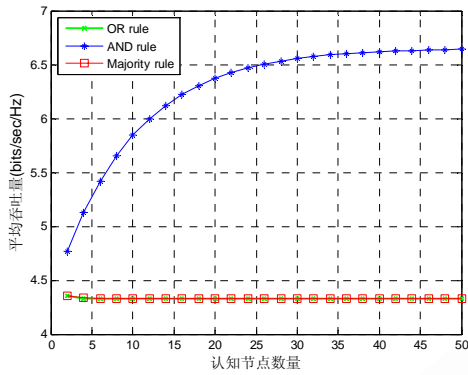
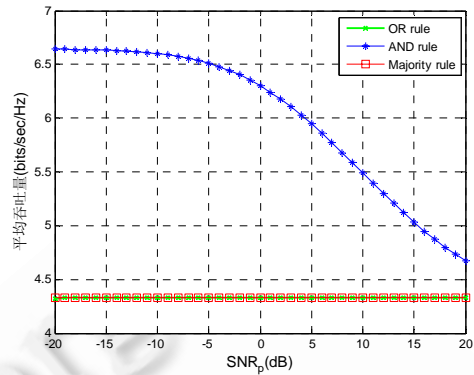


图6 平均吞吐量与认知节点数量关系

图7 平均吞吐量与 SNR_p 关系

5 结束语

针对在认知无线传感器网络中应用传统的认知无线网络架构所导致的频谱接入不连续和数据传输不连续问题,提出了一种新的认知无线传感器网络架构.通过在网络中部署专门负责频谱感知的认知节点,将频谱感知与数据传输功能进行了合理地划分.同时,由于无需全网设备增加认知模块,降低了设备成本和网络能耗.在新的网络架构下,进一步提出了新的帧结构,可以同时最大化感知时间与传输时间,进而实现对频谱的实时感知和数据的连续传输.此外,在认知节点采用了协作感知和宽带感知策略.前者可以进一步提高检测的可靠性,充分保护主用户,后者有利于实现传感器网络对授权频段的连续性接入.为了衡量新的网络架构的合理性,通过仿真实验对不同硬融合准则下的网络吞吐量进行了比较和分析.结果表明,新的网络架构所获得的吞吐量要好于传统网络架构,并且 AND 准则更适合于认知无线传感器网络.未来,在新的网络架构下,网络节点在 MAC 层的传输调度问题是下一步研究的重点.

References:

- [1] Liang W, Zhang XL, Xiao Y, Wang FQ, Zeng P, Yu HB. Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2011,11:1197–1212.
- [2] He ZD, Zang WN, Wang HF, Huang WJ. Joint routing and scheduling optimization in industrial wireless networks using an external dynamics algorithm. *Information and Control*, 2014,43(2):152–158 (in Chinese with English abstract).
- [3] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communication Magazine*, 2002,40(8):102–114.
- [4] Ma J, Li GY, Juang BHF. Signal processing in cognitive radio. *Proc. of the IEEE*, 2009,97(5):805–823.
- [5] Kan BQ, Fan JH, Wang JY. MAC protocols for cognitive radio networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(7):1824–1837 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4225.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04225]
- [6] Akan OB, Karli OB, Ergul O. Cognitive radio sensor networks. *IEEE Network*, 2009,23(4):34–40.
- [7] Han JA, Jeon WS, Jeong DG. Energy-Efficient channel management scheme for cognitive radio sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011,60(4):1905–1910.
- [8] Maleki S, Pandharipande A, Leus G. Energy-Efficient distributed spectrum sensing for cognitive sensor networks. *IEEE Sensor Journal*, 2011,11(3):565–573.
- [9] Najimi M, Ebrahimpzadeh A, Andargoli SMH, Fallahi A. A novel sensing nodes and decision node selection method for energy efficiency of cooperative spectrum sensing in cognitive sensor networks. *IEEE Sensor Journal*, 2013,13(5):1610–1621.
- [10] Deng RL, Chen JM, Yuen C, Cheng P, Sun YX. Energy-Efficient cooperative spectrum sensing by optimal scheduling in sensor-aided cognitive radio networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2012,61(2):716–725.

- [11] Hareesh K, Poonam S. An energy efficient hybrid cooperative spectrum sensing technique for CRSN. In: Proc. of the Int'l Multi-Conf. on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s). Kottayam: IEEE Press, 2013. 438–442.
- [12] Ozger M, Akan OB. Event-Driven spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computer Communications (Infocom). Turin: IEEE Press, 2013. 1483–1491.
- [13] Jamal A, Tham CK, Wong WC. Event detection and channel allocation in cognitive radio sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communication Systems (ICCS). Singapore: IEEE Press, 2012. 157–161.
- [14] Lin SC, Chen KC. Improving spectrum efficiency via in-network computations in cognitive radio sensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2014,13(3):1222–1234.
- [15] Liang YC, Zeng YH, Peh ECY, Hoang AT. Sensing-Throughput tradeoff for cognitive radio networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(4):1326–1337.
- [16] Quan Z, Cui S, Sayed AH, Poor HV. Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks. IEEE Trans. on Signal Processing, 2009,57(3):1128–1140.
- [17] Umar R, Sheikh AUH, Mohamed D. Unveiling the hidden assumptions of energy detector based spectrum sensing for cognitive radios. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014,16(2):713–728.
- [18] Mishra SM, Sahai A, Brodersen RW. Cooperative sensing among cognitive radios. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Istanbul: IEEE Press, 2006. 1658–1663.
- [19] Zhang W, Mallik KR, Letaief KB. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2009,8(12):5761–5766.
- [20] Maleki S, Chepuri SP, Leus G. Optimization of hard fusion based spectrum sensing for energy-constrained cognitive radio networks. Physical Communication (Elsevier), 2013,9:193–198.

附中文参考文献:

- [2] 何之栋,张伟宁,王海凤,黄文君.工业无线网络路由及调度联合极值优化.信息与控制,2014,43(2):152–158.
- [5] 阚保强,范建华,王建业.认知无线网络信道接入协议.软件学报,2012,23(7):1824–1837. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4225.htm>
[doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04225]



许驰(1987—),男,辽宁沈阳人,博士生,主要研究领域为认知无线电,无线传感器网络.

E-mail: xuchi@sia.cn



梁炜(1974—),女,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为工业无线网络,无线传感器网络.

E-mail: weiliang@sia.cn



郑萌(1983—),男,博士,副研究员,主要研究领域为无线传感器网络,认知无线网络.

E-mail: zhengmeng_6@sia.cn



于海斌(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为工业自动化,无线传感器网络,网络化控制.

E-mail: yhb@sia.cn