

典型部署策略下认知无线传感网的机会频谱接入方法

李文翔^{1,2}, 马娅婕^{1,2}, 柯鹏³

- (1. 武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学 教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心, 湖北 武汉 430081;
3. 武汉科技大学 计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430065)

摘 要: 在典型规则拓扑模式及覆盖部署方式的传感网中探讨无冲突的认知频谱接入方法(包括频谱和时隙分配、协作频谱感知和感知结果汇报方案), 为数据采集提供高效的传输手段。提出对应网络环境下的次级用户的阻塞率和掉话率、各拓扑模式下的网络有效接收带宽和最大传输时延的分析模型。通过对几种拓扑模式的比较, 表明 Triangle 的协作频谱感知效果最佳, 而 Square 的有效接收带宽最佳; 在完全覆盖部署方式下, Square 和 Triangle 的传输时延较小, 而多重覆盖部署方式下 Square 的时延最小。指出单个节点上的虚警概率对传输时延的影响不大, 授权用户出现概率则对时延有明显影响, 而选择较大的传输时隙/感知时隙比能显著降低时延。

关键词: 认知传感网; 拓扑模式; 信道分配; 协作感知; 网络容量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z2-0033-09

Opportunistic spectrum access method for cognitive radio sensor network of typical deployment strategies

LI Wen-xiang^{1,2}, MA Ya-jie^{1,2}, KE Peng³

- (1. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Detecting Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
3. School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: Explored the opportunistic spectrum access method for cognitive radio sensor networks with regular topology patterns and coverage patterns. The method includes an economic spectrum-and-timeslot-allocation scheme, a sensing-results-reporting scheme and a cooperative spectrum-sensing scheme. A model was proposed for analyzing the blocking and dropping probability for secondary users, the effective reception bandwidth and transmission delay. Numerical analysis shows that Triangle yields the optimal cooperative sensing performance, and square yields the optimal reception bandwidth. In case of complete coverage, Square and triangle lead to less transmission delay, and in case of multiple coverage, square leads to the least transmission delay. The false alarm probability of single node has little impact on transmission delay, and Primary User's activity may affect delay noticeably. On the other hand, larger ratio of transmission timeslot to sensing timeslot helps to decrease delay.

Key words: cognitive radio sensor network; topology pattern; channel allocation; cooperative sensing; network capacity

1 引言

认知无线网络技术^[1]能通过对信道的智能感知

和接入, 在有限区域中协作利用频谱资源, 减小通信冲突。将认知无线网络应用在密集部署的无线传感网中, 可以使相邻的节点采用不同的信道通信, 显著提

收稿日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104215); 湖北省教育厅科技研究计划基金资助项目(Q20141110); 武汉科技大学教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心开放基金资助项目(MARC201304)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61104215); The Science and Technology Research Plan of Education Department of Hubei Province (Q20141110); The Open Fund of Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Detecting Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology (MARC201304)

升网络吞吐量并降低能耗,其中各传感节点为次用户(SU),而区域内的人工操纵的移动节点则为主用户(PU)。考虑到规则拓扑结构具有覆盖效率高、定位准确等特点,尤其适合大面积空旷区域的传感网部署,本文针对无线传感网的基本规则拓扑模式^[2]和覆盖模式,探讨面向机会频谱接入的网络部署、资源分配及调度方法,相关贡献体现在如下两方面。

1) 面向 Square、Triangle 和 Hexagon 3 种网格拓扑,设计基于 TDMA 的接入方法(CART, cognitive access for regular topology),包括经济的频谱分配方案(以不随网络规模变化的恒定信道和时隙开销实现节点间无干扰通信),高效的感知结果汇报调度方案(以在通用控制信道中无冲突的同步传输感知结果),及最优协作频谱感知方案。

2) 分析 SU 的传输阻塞和掉话情况,提出有效接收带宽的描述模型,从这个角度分析 CART 优于固定信道方法 MAX^[3]的约束条件,比较 3 种拓扑模式采用 CART 接入的有效接收带宽的高低;分析 PU 活动概率、SU 虚警概率和传输时隙对最大传输时延的定性影响,并比较 3 种拓扑模式在不同覆盖模式下的传输时延。

2 相关工作

2.1 规则拓扑传感网的部署开销

根据区域内监视任一位置的有效传感节点数目,有不完全覆盖、完全覆盖和多重覆盖这 3 类部署方式,其中不完全覆盖指有的位置没有被节点覆盖,完全覆盖指每个位置都被至少一个节点覆盖,而多重覆盖指每个位置都被至少 2 个节点覆盖。

本文考虑具有代表性的临界完全覆盖^[3-5]和临界多重覆盖^[6,7]的情况,图 1(a)中的感知半径 r_s 确保了临界完全覆盖,图 1(b)中的 r_s 确保了临界多重覆盖,而 Hexagon 在 2 种覆盖情况的 r_s 相同。采用 Voronoi 多边形面积^[6](记为 AVP)来描述部署效率:各传感节点都占据一个 Voronoi 多边形,且其为距离此多边形内的每个位置点最近的传感节点,如图 1(a)中的各虚线区域所示。其面积表示为

$$AVP = ur_s^2 \quad (1)$$

计算得覆盖系数 u 如表 1 所示,从中看出,临界完全覆盖时 Triangle 的覆盖效率最高(单位面积内采用 Triangle 覆盖网络所需节点数最少),其次为 Square,而临界多重覆盖时,Hexagon 的覆盖效率最高, Square 次之。

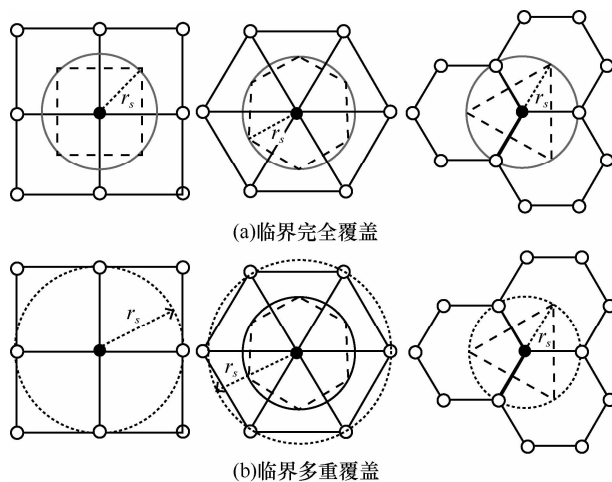


图 1 规则拓扑中的传感节点覆盖模式

表 1 有效覆盖面积的相对系数 u

临界覆盖方式	Square	Triangle	Hexagon
临界完全覆盖	2	2.6	1.3
临界多重覆盖	1	0.866	1.3

2.2 规则拓扑传感网的传输性能

文献[8~10]指出在不考虑干扰的情况, Triangle 具有最小的能耗、时延和最高的路径效率,而存在干扰的情况下, Hexagon 具有最高的传输成功概率和吞吐量,因为可造成干扰的邻节点较少。文献[11]面向吞吐量最大化目标,研究公平的速率分配方法,提出了链路容量和最佳传输速率的定量描述,分析表明当网络规模(体现为通信跳数 hop)在 100 跳以下时,实现最大吞吐量的拓扑是 Triangle,当 hop 继续增大时, Square 和 Hexagon 依次提供最大吞吐量。文献[3]提出基于拓扑分块的 TDMA 接入协议 MAX,通过有效调度实现节点无干扰同步通信,给定链路带宽 BW, Hexagon、Square 和 Triangle 所能达到的链路吞吐量分别为 $BW/4$ 、 $BW/5$ 和 $BW/7$ 。

以上工作指出各种部署模式发挥最佳效能的特定条件,但都局限于固定信道通信。本文针对机会频谱接入场景,探讨实现高效传输的方法,并指出 CART 在不同拓扑模式下的适用条件。

3 规则拓扑的认知接入方法

3.1 网络时隙设置

令各节点通信半径均为 r_c , 干扰信号影响半径 I 一般大于 r_c , 为简便起见,考虑 I 取 r_c 整数倍的 2 种典型情况,即 $I=r_c$ 、 $I=2r_c$ 。假设节点配备单无线

电多信道接口，且节点间实现了启动/休眠同步，基于拓扑规则性采用协作频谱感知策略和 TDMA 调度方式。整个网络生存期由多个数据采集周期(简称 DCC)组成，每个 DCC 的长度足以完成网络中所有数据分组到 Sink 的传输，包含工作时间和休眠时间 2 部分。在工作时间的起始时刻，每个节点采集数据并生成等量的数据分组。工作时间又由多个固定长度的数据传输周期(简称 DTC)组成。一个 DTC 足以完成一次包含机会频谱接入过程的传输，可分为针对自身所用信道的 PU 感知阶段 T_s 、感知结果的汇报阶段 T_r 和传输阶段 T_c 3 个部分^[12,13]，如图 2 所示的时段含有 3 个 DTC。

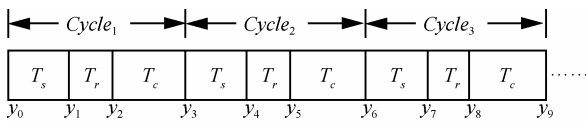


图 2 数据传输周期组成

3.2 信道和传输时隙分配方案

感知阶段中，给定节点感知单个信道所需时间 T_{s0} ，则 T_s 可被划分为 l 个感知时隙， $T_s = lT_{s0}$ ， l 等于网络所用的最大信道数，为了减小对 PU 的干扰，则希望 l 尽可能小。传输阶段中，给定预设的基本传输时隙的长度 T_{c0} ， T_c 可被划分为 n 个传输时隙， $T_c = nT_{c0}$ ， n 代表一个 DTC 中的实际数据传输时隙数目，设定 n 与节点的邻节点数目相等，这样在每个 DTC 中都能和每个邻节点进行恰好一次通信。

给定 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq l$ ，为每条链路指定一个着色 2 元组 (t_i, c_j) ，其中 t_i 是所选时隙， c_j 是所选信

道。用最小的 l 满足 2 个约束。C1：各节点的各条链路的 t_i 互不相同，以确保该节点与各邻点采用不同的时隙通信，C2：具有相同着色 2 元组的链路至少间隔 $l/r_c + 1$ 跳，以保证通信互不干扰。具体分配在网络部署时进行，分为 2 步实现。第一步进行传输时隙分配，从 Sink 点的链路开始，除了约束 C1 外，还要求满足平行原则和相似原则。平行原则是指最近的平行链路可采用相同的时隙，例如图 3(a) 两行间的垂直链路均可采用时隙 t_1 或 t_3 。相似原则是指位于单元网格中相似位置且相距 2 跳整数倍的节点可采用相同的时隙设置，例如图 3(a) 各列中从下往上的第 1、3、5 个节点可采用相同时隙。第 2 步为各链路逐行分配信道。选择一个待处理链路，在所有已处理链路所选的信道中寻找一个信道，使待处理链路也满足 C2，如果没有找到，则选择一个能满足 C2 的新信道，绑定给待处理链路，则此链路处理完毕，重复此循环直到所有链路处理完毕。例如图 3(a) 中，链路 A-B 绑定信道 c_2 ，与采用信道 c_1 的同时隙链路 C-D 不冲突，同时由于距离足够远，与同信道同时隙的链路 E-F 不冲突。

各拓具体的分配结果如图 3~图 5 所示，通过复用，无论网络规模多大，Square、Triangle 和 Hexagon 在 $l=r_c$ 时，所需的最小总信道数分别恒定为 2、3、2，在 $l=2r_c$ 时分别恒定为 6、6、4。

3.3 感知结果汇报调度方案

在 T_s 结束时生成汇报数据分组，其中包含近期本节点所获知的相关信道的 PU 信息。之后各节点都通过同一控制信道向 1-hop 邻节点汇报自己的感

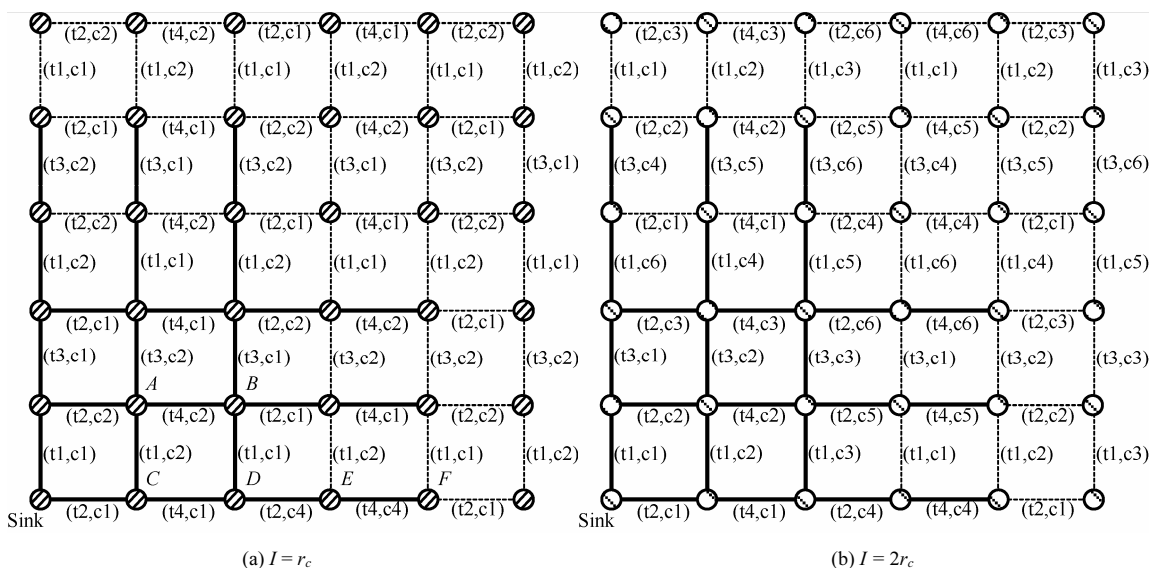


图 3 Square 中的传输时隙和信道分配

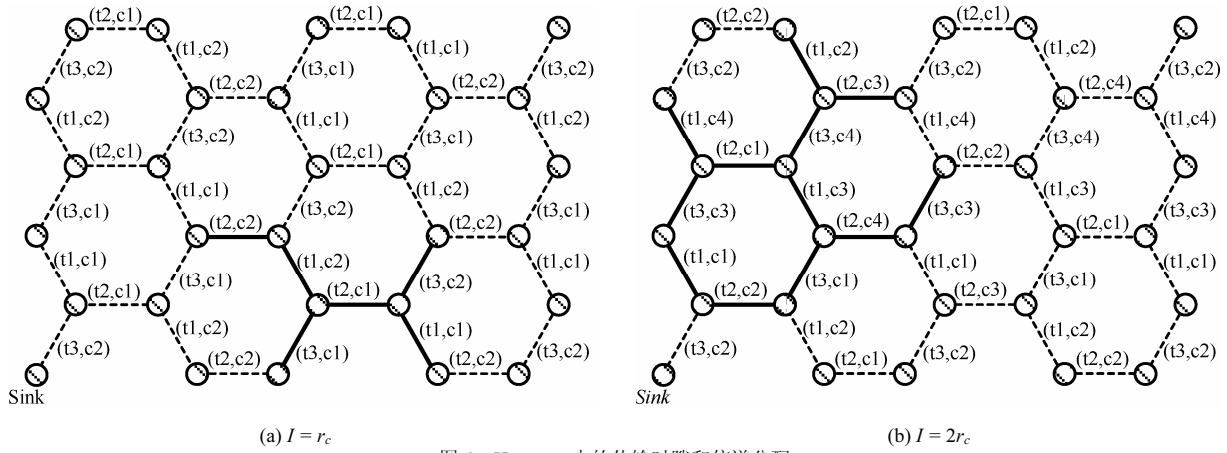


图 4 Hexagon 中的传输时隙和信道分配

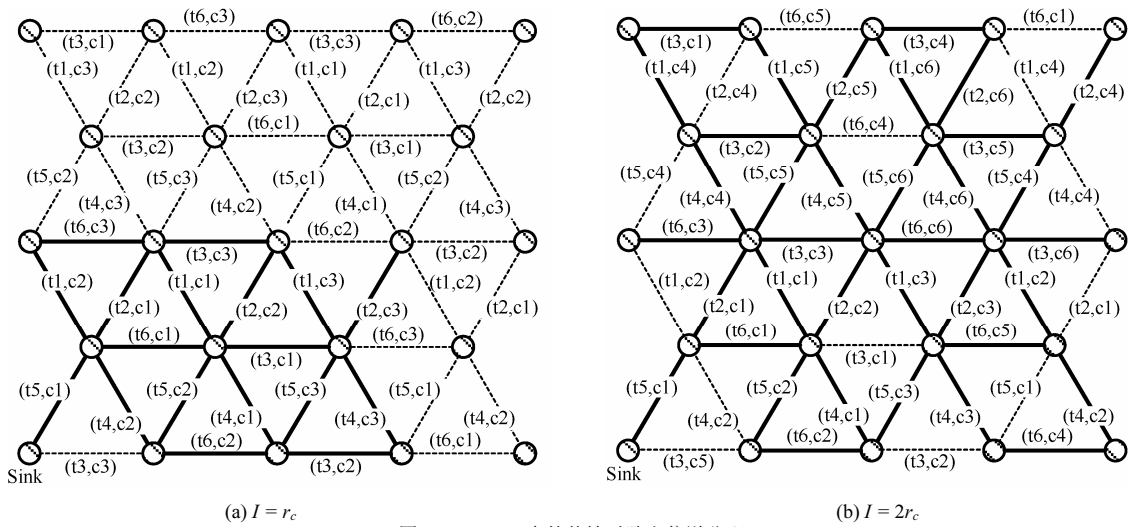


图 5 Triangle 中的传输时隙和信道分配

知结果。记一个节点汇报感知结果所需的时间为 T_{r0} ，将 T_r 等分为 m 个汇报时隙， $T_r = mT_{r0}$ 。借鉴 MAX 的调度方法，希望 m 尽可能小以减小汇报时延开销。要在空间上确保无冲突，则将网络分割成多个尽可能小的分块(如图 6 的阴影区域所示)，在块中具有相似位置的不同链路可进行无干扰同步通信，如图 6(a)中的 A-C 和 B-D 两链路、图 6(b)

中的 A-C 和 E-F 两链路。在 $I=r_c$ 和 $I=2r_c$ 时，每个分块分别对应块中心节点的 1-hop 支配集及 2-hop 支配集，每块中的节点数即为汇报时隙数 m ，分别为 5 和 13。

基于以上分析得到每个 DTC 的时长为

$$T = T_s + T_r + T_c = lT_{s0} + mT_{r0} + nT_{c0} \quad (2)$$

其中，各类时隙的数目如表 2 所示。

表 2 各种拓扑模式机会频谱接入的时隙数目设置

拓扑模式	l		m		n
	$I = r_c$	$I = 2r_c$	$I = r_c$	$I = 2r_c$	
Square	2	6	5	13	4
Triangle	3	6	7	19	6
Hexagon	2	4	4	10	3

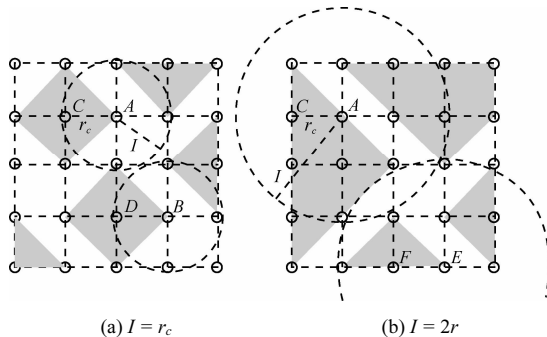


图 6 Square 中同信道无干扰通信的分块方法

3.4 协作频谱感知方案

假设各节点的感知性能(对某信道感知的虚

警概率 P_{f0} 和漏报概率 P_{m0}) 完全相同, 协作频谱感知能实现更佳的性能, 体现在协作感知虚警概率 Q_f 、协作感知漏报概率 Q_m 或检出概率 Q_d 。收到邻节点传来的感知结果后, 采用特定的数据融合方法^[14], 各节点得到自己的协作频谱感知结果。最基本的融合准则是 K -out-of- N ^[15], 各拓扑模式的协作感知方案的区别主要在参数 N 上, 在 1-hop 范围内的协作感知则有 $N=n+1$ 。在协作感知过程中, 如果未收到某邻节点关于某个信道的结果, 则采用保守策略, 认为此邻节点在此信道遇到 PU。给定链路失效概率 p_e , 得到来自该邻节点的局部感知结果

$$P_f = (1 - p_e)P_{f0} + p_e(1 - P_{f0}) \quad (3)$$

$$P_m = (1 - p_e)P_{m0} \quad (4)$$

其中, 局部虚警概率式(3)包含 2 种情况: 1) 当前节点成功收到邻节点的虚警汇报; 2) 邻节点报告 PU 未出现, 但当前节点未成功接收此消息并认为 PU 出现, 局部漏报概率式(4)体现成功收到邻节点漏报汇报消息的情况。考虑所有邻节点得

$$Q_f = P_{f0} \sum_{j=K-1}^n C_n^j P_f^j (1 - P_f)^{n-j} + (1 - P_{f0}) \sum_{j=K}^n C_n^j P_f^j (1 - P_f)^{n-j} \quad (5)$$

$$Q_d = 1 - Q_m = P_{m0} \sum_{j=K}^n C_n^j (1 - P_m)^j P_m^{n-j} + (1 - P_{m0}) \sum_{j=K-1}^n C_n^j (1 - P_m)^j P_m^{n-j} \quad (6)$$

式(5)中 Q_f 由 2 种情况组成, 1) 本地虚警加上至少 $K-1$ 个邻节点虚警; 2) 本地未虚警但有至少 K 个邻节点虚警。式(6)中 Q_d 也由 2 种情况组成: 1) 本地检出加上至少 $K-1$ 个邻节点检出; 2) 本地未检出但有至少 K 个邻节点检出。

按满足 $Q_m < 0.01$ 和 $Q_f < 0.1$ 的原则^[16], 基于式(5)、式(6)选择各拓扑中实现最佳协作感知效果的 K (在 Square、Triangle 和 Hexagon 中分别取 2、3、2), 得到各拓扑模式的最优协作感知效果如图 7 所示, 其中 FA 代表虚警概率、MD 代表漏报概率。可看出 Triangle 的感知效果最佳, 当 $P_{f0}=P_{m0}=0.1$ 时, Square、Triangle 和 Hexagon 的 Q_f 分别为 0.091、0.031 和 0.058, 而它们的 Q_m 均接近于 0。

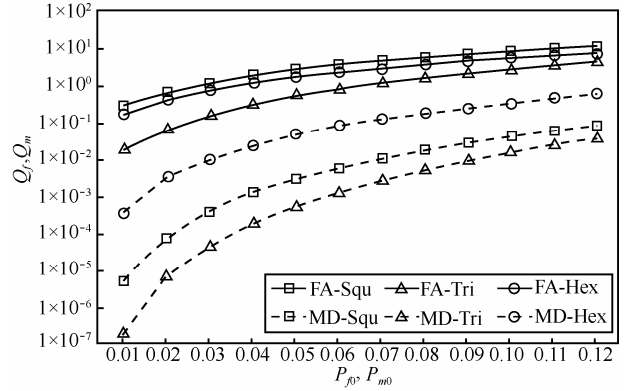


图 7 各拓扑模式采用各自最优融合方案的感知效果比较

4 传输性能分析

4.1 SU 的掉话与阻塞概率

每个 DTC 开始时刻, PU 以概率 p 随机出现在每个认知节点的感知区域中, 在机会频谱接入环境下, 完成正常通信需要满足 3 个条件: 无 PU 存在、无虚警判决且无链路差错。按 PU 出现概率从小到对信道排序, 得到用于频谱切换的备用信道列表。当 SU 认定 PU 出现后, 向相关邻节点通告这一情况, 终止相关信道中的传输, 并在备用信道表中选择合适信道切换, 不采用此信道的传输时隙则不受影响。基于预设的备份信道, 认为 T_c 的长度足够完成频谱切换。考虑到 Q_m 接近于 0, 认为在 2 个相邻的 DTC 内没有连续漏报的现象。参考信道接入的 Backoff 过程, 认为 2 个 PU 在同一信道出现的时间间隔远大于 T 。基于图 2 分析特定信道中的掉话和阻塞状况如下。

在感知阶段 y_0 至 y_1 内出现 PU 时, 若在 y_2 漏报, 则在 $Cycle_1$ 的对应传输时隙有严重的分组丢失, PU 将在 y_3 检出, 在 $Cycle_2$ 的对应传输时隙阻塞并进行频谱切换, 对 $N_{m1}=2$ 个 DTC 造成影响; 若在 y_2 检出, 则 SU 在 $Cycle_1$ 的对应传输时隙阻塞并进行频谱切换, 对 $N_{d1}=1$ 个 DTC 造成影响。

在 y_0 至 y_1 内不出现 PU 时, 若在 y_2 无虚警判决, 则此 DTC 传输正常; 若在 y_2 有虚警判决, 则 SU 在 $Cycle_1$ 的对应传输时隙阻塞并进行频谱切换, 对 $N_f=1$ 个 DTC 造成影响。

在汇报和传输阶段 y_1 至 y_3 内出现 PU 时, 若在 y_3 漏报, 则在 $Cycle_1$ 和 $Cycle_2$ 的对应传输时隙有严重的分组丢失, PU 将在 y_4 检出, 在 $Cycle_3$ 的对应传输时隙阻塞并进行频谱切换, 对 $N_{m2}=3$ 个 DTC

造成影响；若在 y_5 检出，在 $Cycle_1$ 的对应传输时隙有严重的分组丢失，在 $Cycle_2$ 的对应传输时隙进行频谱切换，对 $N_{d2}=2$ 个 DTC 造成影响。

在 y_1 至 y_3 内不出现 PU 时，若在 y_5 无虚警判决，则此 DTC 传输正常；若在 y_5 有虚警判决，则 SU 在 $Cycle_1$ 的传输正常且有效，在 $Cycle_2$ 的传输阶段阻塞并进行频谱切换，对 $N_f=1$ 个 DTC 造成影响。

综合以上分析，得一个 DTC 内掉话现象的发生源于漏报，其概率为

$$p_d = pQ_m \quad (7)$$

阻塞的发生包括本 DTC 检出 PU、本 DTC 虚警以及前 DTC 冲突导致本 DTC 频谱切换产生阻塞这 3 种可能^[17]，考虑以上各现象发生的独立性，得整体阻塞概率为

$$p_b = p(1-Q_m) + (1-p)Q_f + pQ_m = p + (1-p)Q_f \quad (8)$$

4.2 传输效率

一个链路在一个 DTC 内的最大有效传输时间为 T_{c0} ，故此链路的最大有效带宽为

$$B_{\text{link}} = (1-p_e)T_{c0}BW/T \quad (9)$$

Sink 接收数据的吞吐量即为网络的实际吞吐量。设一个 DTC 中 Sink 接收数据所用的传输时隙固定为 t 个，基于图 3~图 5，对 Hexagon 有 $t=1$ ，对 Square 和 Triangle 有 $t=2$ 。没有 PU 干扰时，Sink 的理想接收带宽为

$$B_{\text{Max}} = tB_{\text{link}} \quad (10)$$

为这 t 个时隙分配 s 个信道， $s \leq t$ ，Sink 使用这些信道的实际时间为传输阶段的 tT_{c0} 和感知阶段的 sT_{s0} 。Sink 在 T_s 和 T_c 内遇见 PU 的概率分别为 $s p T_{s0}/T$ 和 $t p T_c/T$ 。使 s 尽可能小，取为 1，即各接收时隙都采用同一接收信道，这样可减小在感知阶段和汇报阶段遇见 PU 的机会，进而降低 PU 对传输的影响。

T_s 间的漏报会使 N_{m1} 个 DTC 中的所有 t 个传输时隙受影响， T_c 间未感知到严重的分组丢失会使 N_{m2} 个 DTC 中的所有 t 个传输时隙受影响，这 2 种情况造成的接收带宽的下降程度为

$$\Delta B_m = (N_{m1}T_{s0} + N_{m2}T_{c0})pQ_m B_{\text{Max}}/T \quad (11)$$

T_s 间的 PU 检出会使 N_{d1} 个 DTC 中的所有 t 个传输时隙受影响， T_c 间感知到严重的分组丢失会使 N_{d2} 个 DTC 中的所有 t 个传输时隙受影响，这 2 种

情况造成的接收带宽的下降程度为

$$\Delta B_d = (N_{d1}T_{s0} + N_{d2}T_{c0})(1-Q_m)pB_{\text{Max}}/T \quad (12)$$

在对接收数据所用信道相关的 1 个 T_{s0} 和 t 个 T_{c0} 做虚警判决后， N_f 个 DTC 中的 t 个传输时隙都会受影响，故虚警造成的接收带宽下降程度为

$$\Delta B_f = (1 - \frac{(T_{s0} + tT_{c0})p}{T})N_f Q_f B_{\text{Max}} \quad (13)$$

考虑 Q_m 接近于 0，得 Sink 有效带宽约为

$$B_{\text{CART}} = B_{\text{Max}} - \Delta B_m - \Delta B_d - \Delta B_f \\ \approx (1 - \frac{(T_{s0} + 2T_{c0})p}{T} - (1 - \frac{(T_{s0} + tT_{c0})p}{T})Q_f)B_{\text{Max}} \quad (14)$$

给定监测区域面积 S ，则网络部署所需节点数目约为 S/AVP ，在两节点间的传输数据量(包括 ACK 回复等交互消息)等效为单向传送一个长为 Len 的分组，当 S 足够大且链路满负荷运行时，Sink 收到一个 DCC 内各点发来的所有数据分组的最小传输时延表示为

$$D_{\text{CART}} \approx \frac{LenS}{AVPB_{\text{CART}}} = \frac{LenS\rho}{(1-p_e)BWr_s^2} \quad (15)$$

考虑到 T_{s0} 和 T_{r0} 长度相当，令 $T_{s0}=T_{r0}$ ，时隙比 $x=T_{c0}/T_{s0}$ ，则系数 ρ 为

$$\rho = \frac{(l+m+nx)^2}{utx((l+m+nx)(1-Q_f) - (1+2x)p + (1+tx)pQ_f)} \quad (16)$$

5 性能分析

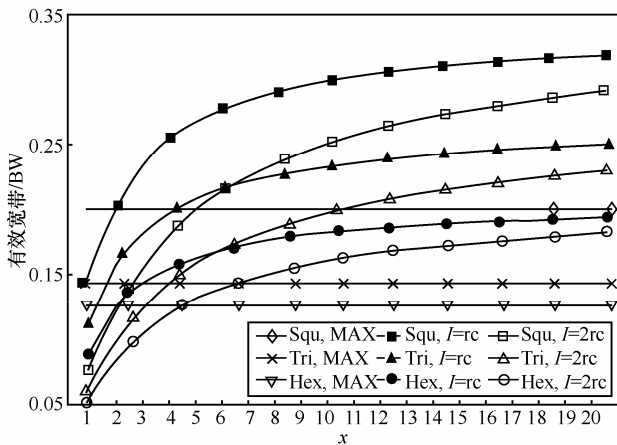
5.1 带宽指标的数值分析

探讨不同条件下 CART 和 MAX 的带宽变化特性。理论上采用 MAX 得到的 Sink 有效接收带宽为

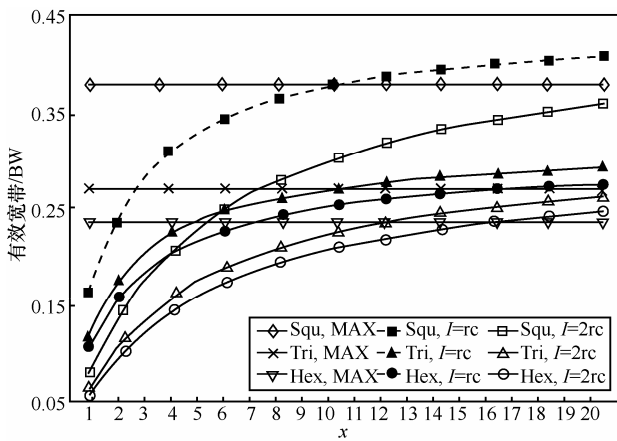
$$B_{\text{MAX}} = tBW(1-p_e)(1-p)/(n+1) \quad (17)$$

基于式(9)、式(14)和式(17)，发现 p_e 对各方案的影响完全相同，所以不考虑其影响(设 $p_e=0$)。 P_{j0} 仅在 CART 中产生影响，这里将其取为 $P_{j0}=0.1$ 的较大值，对应 CART 性能偏弱的保守情况。固定 T_{s0} 和 T_{r0} ，分别取 $p=0.5$ (PU 影响大的情况)及 $p=0.05$ (PU 影响小的情况)，依式(14)和式(17)得 Sink 有效带宽随 x 变化的特性如图 8 所示，水平线为采用 MAX 得到的结果，曲线为不同 l 下采用 CRAT 得到的结果。

可看出,随 x 增大 CART 的有效带宽持续增大,但增速渐渐下降;当 x 足够大时, DTC 中更多的时段可用于有效传输,此时 CART 优于 MAX。但特例是图 8(b)中, $I=2r_c$ 时 Square 中 MAX 的带宽一直高于 CART。比较图 8(a)和图 8(b)发现, MAX 在两图中的带宽变化比 CART 的要大,故 PU 对 MAX 的影响比对 CART 的要大。当 PU 活动概率较高时, CART 能以更小的 x 优于 MAX。基于表 2,更大的干扰半径会导致更大的感知和汇报时间开销,故当 I 增大到 $2r_c$ 时,对应的有效带宽显著下降。



(a) 高 PU 影响, $p=0.5$



(b) 低 PU 影响, $p=0.05$

图 8 Sink 有效带宽随时间设置的变化特性

5.2 传输时延指标的仿真实验

由于不同拓扑的部署开销和采集数据总量的不同,带宽难以准确比较各个拓扑及部署方式的相对性能,更适合采用最大传输时延这个指标。基于 OMNet++ 展开仿真实验,参数如下:拓扑长宽分别为 300 m 和 200 m、信号感知半径 $r_s=15$ m、等效数据分组长 $Len=250$ bit、链路理想带宽 $BW=250$ kbit/s、 $I=r_c$ 。

指定 3 种仿真场景: 1) $x=10, p=0.35, P_{f0}$ 从 0.01 增到 0.1; 2) $x=10, P_{f0}=0.1, p$ 从 0.05 增到 0.5; 3) $p=0.05, P_{f0}=0.1, x$ 从 8 增到 20。得到结果如图 9 所示。可以看出,由于流量分布不均匀导致某些时隙的利用率较低,实际仿真结果(标记为 S)一般要大于理论计算值(标记为 T)。

可以看出, P_{f0} 变化对时延影响不明显,而 p 变化对时延的影响比较显著,时延随 T_{c0}/T_{s0} 增加的变化比较明显,说明在运行时选择较大的 T_{c0}/T_{s0} 有利于提升传输效率。在完全覆盖时, Triangle 和 Square 的时延相当,远小于 Hexagon,其原因在于 Hexagon 对应的 Sink 接收时隙仅为 1,此时 Triangle 和 Square 的部署效率较高。

基于表 1 发现, Square 中实现多重覆盖所需节点数比完全覆盖时加倍,而 Triangle 中变为 3 倍,导致这 2 种拓扑的传输数据量和时延在多重覆盖时明显增加,而 Hexagon 中保持不变。最终多重覆盖时 Square 的传输时延最小,部署效率最高,Hexagon 的次之, Triangle 的部署效率最低。在 $I=2r_c$ 时结论相似。

6 结束语

文中提出的面向规则拓扑的认知频谱接入方法能高效复用频谱资源,所需的最小时隙和信道数目都不随网络规模增大而变化,从而保证了较小的频谱资源开销。给出阻塞率、掉话率、有效接收带宽和最大传输时延的定量描述模型,数值分析指出在 3 种拓扑模式中, Triangle 的协作感知效果最佳, Square 次之,而 Square 的有效接收带宽最佳、 Triangle 次之。OMNet++ 平台下的仿真实验指出在完全覆盖方式下, Square 和 Triangle 的传输时延较小,而在多重覆盖方式下, Square 的时延最小, Hexagon 次之。PU 出现概率对传输时延有明显影响,在设计时选择较大的传输/感知时隙比有利于降低时延。以上结论为具体应用中部署模式的选择提供了参考。

实际应用环境难以采用理想的规则拓扑模式,需要针对规则拓扑模式的组合与演化情况(包括具有 Scale-free、Small-world 特性的拓扑模式、离散区域的连通—覆盖问题等),展开认知方法设计。同时,有必要探讨相关认知接入方法的能耗和容错特性、对应的高效路由策略(机会路由、容错路由、饱和和流等)和协同工作策略。

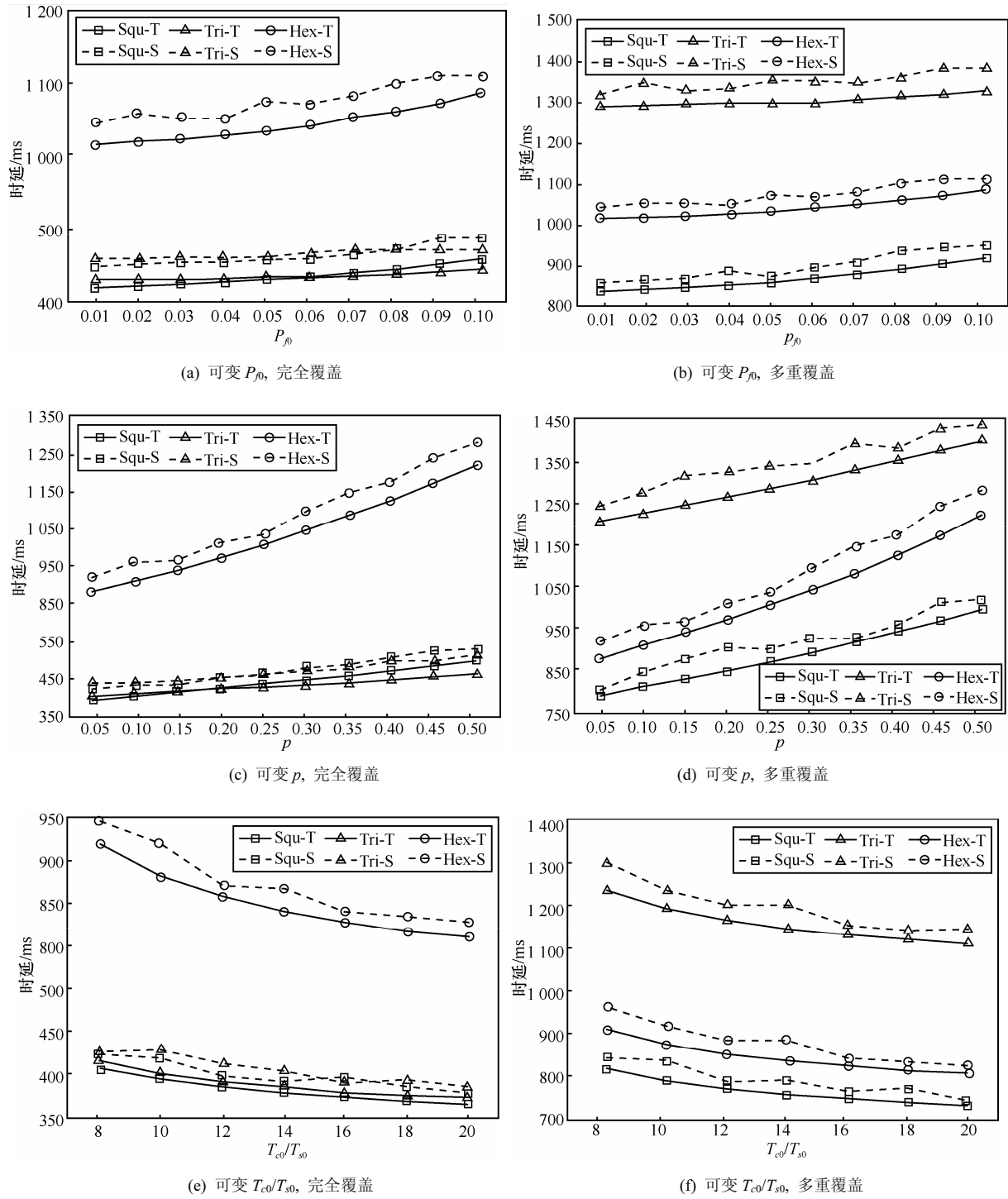


图 9 各拓扑采用 CART 方法的传输时延比较

参考文献:

[1] KONSTANTINOS P, PRASHANT K, MARTIN W, *et al.* Cognitive radio networks: realistic or not?[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(2): 44-51.

[2] YUN Z Q, BAI X L, XUAN D. Complete optimal deployment patterns for full-coverage and k -connectivity ($k < 6$) wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Tran on Networking, 2010, 18(3): 934-947.

[3] MANGHARAM R, RAJKUMAR R. MAX: A maximal transmission concurrency MAC for wireless networks with regular structure[A]. 3rd IEEE International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems [C]. San Jose, USA, 2006, pp. 4374406.

[4] LIU Y K, CAI L Xi, SHEN X M, *et al.* Deploying cognitive cellular networks under dynamic resource management[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 82-88.

[5] MIAO Z, CUI L G, ZHANG B H, *et al.* Deployment patterns for

- k -coverage and 1-connectivity in wireless sensor networks [A]. IET International Conference on Wireless Sensor Networks 2010 [C]. Beijing, China, 2010.73-77.
- [6] WANG Y, DHARMA P A. Optimizing sensor networks for autonomous unmanned ground vehicles [A]. SPIE[C]. Cardiff, UK: SPIE Press, 2008.1-11.
- [7] 李文翔, 马娅婕, 徐俊等. 无线传感网规则拓扑结构的部署与设计综述 [J]. 通信学报, 2012, 33(Z2): 207-216.
LI W X, MA Y J, XU J, *et al.* Survey on the deployment and design for regular topology structures in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z2): 207-216.
- [8] LIU X W, HAENGGI M. Throughput analysis of fading sensor networks with regular and random topologies[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2005,(4): 554-564.
- [9] LIU X W. Performance Analysis and Topology Control of Large Wireless Networks With Fading[D]. Notre Dame, USA: University of Notre Dame, 2007.
- [10] JIN Y L, MIAO H J, WANG H. Power-efficient topologies for wireless sensor networks with fixed communication range[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2010, 14(1): 39-44.
- [11] NARYANAN, JUN J H, PANDIT V. Proportionally fair rate allocation in regular wireless sensor networks[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops 2011[C]. Shanghai, China, 2011. 549-554.
- [12] SALIM E, SUZAN B, TUNA T. Energy-efficient multi-channel cooperative sensing scheduling with heterogeneous channel conditions for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(6): 2690-2699.
- [13] ARASH A, FRIGON J F, SANZO B. Reliability analysis of a channel restoration mechanism for opportunistic spectrum access[J]. Computer Communications, 2013, 36(8): 947-961.
- [14] DING G R, WANG J L, WU Q H, *et al.* Spectrum sensing in opportunity-heterogeneous cognitive sensor networks: How to cooperate?[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(11): 4247-4255.
- [15] CUI C M, WANG Y M. Analysis and optimization of sensing reliability for relay-based dual-stage collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72(4): 2321-2337.
- [16] LIU G, ZHU X, ZHU G X. Impact of variance of heterogeneous spectrum on performance of cognitive radio ad hoc networks[A]. Proc of IEEE ICC[C]. Ottawa, Canada, 2012.1869-1873.
- [17] ZHANG C R, YU R, ZHANG Y. Performance analysis of primary user emulation attack in cognitive radio networks[A]. Proc of IWCMC[C]. Cyprus, 2012.371-376.

作者简介:



李文翔 (1979-), 男, 湖北武汉人, 博士, 武汉科技大学副教授, 主要研究方向为认知无线网络、无线传感器网络。



马娅婕 (1974-), 女, 广西横县人, 博士, 武汉科技大学教授, 主要研究方向为网络智能控制、无线传感器网。



柯鹏 (1977-), 男, 湖北武汉人, 博士, 武汉科技大学讲师, 主要研究方向为无线工业控制网络。