

考虑网络稳定性的认知无线传感器网络分簇协议*

郑萌^{1,3}, 陈思^{1,2}, 梁炜¹, 王楚晴^{1,2}



¹(中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

²(中国科学院大学, 北京 100049)

³(广州中国科学院沈阳自动化研究所分所, 广东 广州 511458)

通讯作者: 梁炜, E-mail: weiliang@sia.cn

摘要: 由于频谱的动态性和自组织的组网特性, 传统认知无线传感器网络的分簇协议存在分簇频率高和开销大的问题, 为此提出了一种考虑网络稳定性的认知无线传感器网络分簇协议. 该协议中, 每个节点根据邻居节点集合和可用信道构建最大边团, 根据最大边团中节点的剩余能量、节点数量和公共可用信道数计算节点权重, 权重大的节点成为邻域簇首, 其他节点加入邻域簇首所在簇成为簇成员. 由于分簇过程中充分考虑网络能耗和频谱动态性, 网络的寿命和稳定性得到显著提升. 大量仿真表明, 该分簇协议相对于其他协议在网络寿命和网络稳定性方面均有明显优势.

关键词: 无线传感器网络; 认知无线电; 分簇协议; 网络寿命; 网络稳定性

中文引用格式: 郑萌, 陈思, 梁炜, 王楚晴. 考虑网络稳定性的认知无线传感器网络分簇协议. 软件学报, 2018, 29(Suppl. (1)): 1-9. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18001.htm>

英文引用格式: Zheng M, Chen S, Liang W, Wang CQ. Network stability-aware clustering protocol for cognitive radio sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018, 29(Suppl. (1)): 1-9 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18001.htm>

Network Stability-Aware Clustering Protocol for Cognitive Radio Sensor Networks

ZHENG Meng^{1,3}, CHEN Si^{1,2}, LIANG Wei¹, WANG Chu-Qing^{1,2}

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

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Shenyang Institute of Automation, Guangzhou, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Due to the dynamics of spectrum and ad-hoc networking, traditional clustering protocols have the issue of high clustering frequency and large communication overhead. To address the issue, this paper for the first time proposes a network stability-aware clustering (NSAC) protocol for cognitive radio sensor networks. In NSAC protocol, each node searches the maximum edge biclique based on its neighbors and available channels. The weight of one node is calculated based on the remaining energy, the numbers of nodes and available common control channels in its maximum edge biclique. The node with the largest weight in the neighborhood will be selected as the cluster head, and the rest of nodes in the neighborhood join the cluster as members. As energy consumption and spectrum dynamics are sufficiently considered in the clustering process, network lifetime and network stability are significantly enhanced. Extensive simulations show that the proposed NSAC protocol markedly outperforms existing works in the aspects of network lifetime and network stability.

Key words: wireless sensor networks; cognitive radio; clustering protocol; network lifetime; network stability

* 基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0202701); 国家自然科学基金(61673371, 71661147005); 广州市科技计划(201804010357)

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2016YFF0202701); National Natural Science Foundation of China (61673371, 71661147005); Science and Technology Program of Guangzhou (201804010357)

收稿时间: 2018-05-01; 采用时间: 2018-08-30

无线传感器网络是由大规模、低成本的传感器节点自组织形成的短距离通信技术,现已广泛应用于环境监测、军事监控和工业自动化领域^[1,2].随着无线技术的快速发展,无线传感器网络和 Wifi、蓝牙等无线技术都工作在免授权的工业、科学及医疗频段(ISM 2.4GHz),这使得该免授权频段变得非常拥挤.无线信道的开放共享特性使得无线传感器网络会受到其他无线技术干扰,严重影响了网络的传输性能.

认知无线传感器网络将认知无线电技术引入到无线传感器网络中,可以实现传感器节点对高质量授权频段的动态机会式接入,为上述问题提供了解决思路.认知无线电技术使通信设备具备认知能力,感知无线电信号,通过节点间彼此协作,对频谱进行分析和判断,动态接入可用的空闲频段,能够有效避免工作在授权频段的主用户和具有认知功能的次用户之间的传输冲突,提高授权频段的利用率^[3-6].然而频谱动态性导致认知无线传感器网络的拓扑频繁变化,导致网络开销巨大.分簇管理能够有效控制频谱动态性引发的开销问题,因此认知无线传感器网络的分簇协议设计近年来成为该领域的研究热点.

过去十几年间研究人员对无线传感器网络的分簇协议进行的全面和深入的研究,在延长网络寿命,减少网络能耗方面提供了全面和系统的解决方法.Heinzelman 等人^[7]提出的 LEACH 协议是最早的适用于无线传感器网络的分簇协议.簇首对簇内节点间的数据融合及转发机制减少了网络通信开销,减少了总体能量的消耗.簇首随机选取的机制解决了负载均衡的问题,最大化网络生命周期.Younis 等人^[8]提出了适用于大型无线传感器网络的混合能效分簇协议 HEED.簇首的选择依据主、次两个参数,而非单一参数.主参数为节点的剩余能量,用于选取候选簇首的集合.次参数为簇内通信代价,用于确定落在多个簇范围内的节点最终属于哪一个簇,平衡簇首之间的负载.簇首通过多跳与基站通信的方式节约能耗,延长网络寿命.之后,还有很多关于 LEACH 和 HEED 的变种协议,文献[9,10]等对无线传感器网络的分簇协议工作给出了全面的总结.

认知无线传感器网络的分簇协议除了需要考虑传统无线传感器网络的总能耗或网络寿命指标,还需要考虑频谱的动态变化.Eletreby 等人^[11]在 LEACH 协议的基础上提出了适用于认知无线传感器网络的频谱感知分簇协议 CogLEACH.簇首选择方式是在 LEACH 协议的基础上,以认知节点检测到的信道数作为权重.簇间采用直序列扩频通信方式进行数据传输.相比于 LEACH 协议,CogLEACH 协议提高了网络的吞吐量和寿命.Zhang 等人^[12]提出了基于分组约束的分布式频谱感知分簇协议 DSAC 和全局频谱感知分簇协议 CSAC,其基本思想是初始化阶段将每个节点设置为一个簇,并在每次迭代期间合并两个最近的簇,直到簇数减少到最优值.节点以全分布式、自组织的方式运行.DSAC 相对于 CSAC,算法复杂度降低.Ozger 等人^[13]提出了事件驱动的频谱感知分簇协议 ESAC.当事件发生时,位于事件发生点和基站之间的节点被激活成为合格节点.根据节点度、可用信道数和到基站的距离等参数确定节点权重,权重最大的节点被选为簇首.事件结束后解散簇,减少不必要的簇的形成和维护开销,减少网络能耗.Milan 等人^[14]提出了基于图论的频谱感知分簇算法.在该算法中将构建簇的问题转变为双向构造问题,最大化平衡簇内节点数和簇内公共可用信道数量.Shah 等人^[15]提出了频谱感知能效多媒体路由协议 SCEEM.根据给定场景来确定最优簇的数目,根据能量和相对频谱感知结果来选择簇首.通过调度不连续的可用频谱,提供连续传输机会.Mustapha 等人^[16]提出了一种基于强化学习的能效频谱感知分簇协议 EESA-RLC.通过与环境进行交互,得到关于能耗和协作感知结果的反馈,得到最优的分簇方案.然而,现有的认知无线传感器网络分簇协议没有考虑簇内公共可用信道备份问题.当簇内公共可用信道被占用且无备用公共可用信道时,网络需要重新分簇.若频谱变化快,则导致网络拓扑变化频繁,分簇频率过高,通信开销加剧.

本文针对传统认知无线传感器网络分簇协议所存在的分簇频率高和开销大的问题,首次提出一种考虑网络稳定性的认知无线传感器网络分簇协议(network-stability-aware clustering protocol for cognitive radio sensor networks,简称 NSAC).认知无线传感器网络中的节点检测自身的剩余能量和可用信道的信息并将其广播.每个节点根据邻居节点集合和可用信道信息构建所有的二分图,其中边数最多的二分图为节点的最大边团.根据最大边团(maximum edge biclique)^[14,17]中的节点剩余能量,节点数量和公共可用信道数计算节点权重.权重大的节点成为簇首,其他节点加入邻居簇首所在簇.当网络中某一个簇的公共可用信道全部被占用,重新构建网络的拓扑结构.该过程充分考虑网络的簇内可用信道数量,尽量实现公共可用信道的多重备份,降低拓扑结构变化频率,提高网络的稳定性.大量仿真表明,所提的分簇协议较其他协议在延长网络寿命、降低拓扑结构变化频率方面

有较大进步.

1 网络模型

假设在网络空间中均匀分布 n 个静态的具有认知功能的节点.所有节点由电池供电,初始能量相同均为 E_0 ,节点 CR_i 的剩余能量用 E_i 表示.认知节点能够检测到空闲频谱的信息,用 C_i 表示节点 CR_i 检测到的可用信道的集合.网络中次用户与主用户共享授权频段并遵守以下规则:(1) 主用户优先访问任意一信道,不会受到次用户传输数据的影响;(2) 次用户只能访问未被主用户占用的信道;(3) 当检测到信道被主用户占用时,次用户立即退出并选择其他未被主用户占用的信道传输信息.

假设所有信道在容量和传播特性等方面完全相同,信道在被主用户占用与未被主用户占用两种状态之间转换,且服从指数分布.可将这一过程转化为半马尔可夫 ON-OFF 模型,如图 1 所示. H_0 表示信道未被主用户占用状态, H_1 表示信道已被主用户占用状态.信道 i 的 H_0 持续时间为 q_i , H_1 持续时间为 p_i .因此信道 i 未被占用的概率为

$$P_{l,i} = \frac{q_i}{q_i + p_i}.$$

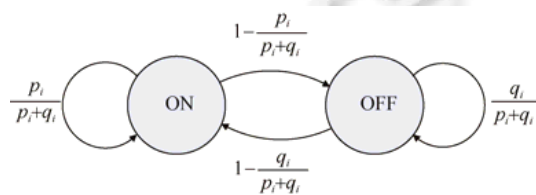


Fig.1 Semi-Markov ON-OFF model

图 1 半马尔可夫 ON-OFF 模型

次用户对信道状态的检测并不是完全准确的,假设节点 j 检测结果正确的概率为 $P_{d,j}$,检测结果错误的概率为 $P_{m,j}$.

$$P_{d,j} = \Pr[\text{信道 } i \text{ 被检测到未被占用} | \text{信道 } i \text{ 未被占用}],$$

$$P_{m,j} = \Pr[\text{信道 } i \text{ 被检测到未被占用} | \text{信道 } i \text{ 被占用}].$$

每一个节点对信道状态的检测都是独立的,节点 j 检测任意一条信道 i 可用的概率

$$P_{\text{available},i,j} = P_{d,j} \times P_{l,i} + P_{m,j} \times (1 - P_{l,i}).$$

频谱动态性会导致网络拓扑频繁变化,开销巨大.分簇管理能够将网络中的节点按照一定的规则划分成不同的簇,有效控制频谱动态性引发的开销问题,同时提高网络的可扩展性.假设所有成员节点均在它们各自的簇首的传输范围内.节点将所有可以接收该节点发送的信息的源节点作为邻居节点,令 N_i 表示节点 CR_i 的邻居节点集合.簇内的所有节点利用相同的簇内可用信道进行通信.当主用户活动时,网络中的信道状态会发生变化.当网络中某一个簇的公共可用信道全部被主用户占用时,网络重新进行分簇.

2 分簇协议

2.1 节点权重

簇中节点包括两类:簇首和成员节点.每个节点可以作为簇首或成员节点运行.成员节点将检测到的信息发送给本簇的簇首.簇首负责将接收到的信息融合,并发送给基站.簇首还负责簇间的交流.所以簇首相对于簇内其他的节点来说需要消耗更多的能量.

簇首负责执行簇内信息融合,进行簇间交流.选择最优簇首需要考虑节点的剩余能量、邻居节点数等诸多参数.本文基于二分图设计了节点权重的计算方法,权重大的节点成为簇首的可能性大.每个节点根据邻居节点集合和可用信道信息构建二分图,根据最大边团中节点的剩余能量、节点数量和公共可用信道数计算节点权重.

过程如下:

节点 CR_i 的邻居节点集合 N_i 存在 $num_i (num_i = 2^{|N_i|} - 1)$ 个非空子集 $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,num_i}$, 其中 $|A|$ 代表集合 A 的元素个数. 用 $y_{i,j}$ 表示 $x_{i,j}$ 中节点与节点 CR_i 的所有公共可用信道集, $z_{i,j}$ 表示 $x_{i,j}$ 中节点与 $y_{i,j}$ 中所有公共可用信道相连的边的集合, $j=1, 2, \dots, num_i$. 每个节点 CR_i 根据 $x_{i,j}, y_{i,j}$ 以 $z_{i,j}$ 及构建二分图 $g_{i,j}=(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}), j=1, 2, \dots, num_i$. 令二分图 $g_{i,j}=(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ 的权重为图中边数的总和, 即 $|x_{i,j}| \times |y_{i,j}|$. 从节点 CR_i 的所有二分图中找出最大边团^[14,17], 即权重最大的二分图 g_{i,j^*} , 其中, $j^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq j \leq num_i} |x_{i,j}| \times |y_{i,j}|$. 令 $G_i = (X_i, Y_i, Z_i) = g_{i,j^*}$, 节点 CR_i 的最大边团的权重 $\omega_{G_i}(X_i, Y_i) = |X_i| \times |Y_i|$. 簇首相对于成员节点需要消耗更多的能量, 为保持负载均衡, 权重设计过程中还需要考虑节点剩余能量. 计算节点 CR_i 在集合 X_i 中的能量占比 $\omega_{E_i}(X_i) = \frac{E_i}{E_i + \sum_{j \in X_i} E_j}$.

综上, 节点权重 $\omega_i(X_i, Y_i) = \omega_{G_i}(X_i, Y_i) + \omega_{E_i}(X_i) = |X_i| \times |Y_i| + \frac{E_i}{E_i + \sum_{j \in X_i} E_j}$.

举例说明. 假设网络中存在 12 个节点, 节点间的拓扑结构如图 2 所示, 其中, $C_a = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10\}, C_b = \{1, 2, 3, 4, 5, 7\}, C_c = \{1, 2, 3, 4, 6, 8\}, C_d = \{1, 2, 5, 10\}, C_e = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10\}, C_f = \{3, 6, 7, 8, 10\}, C_g = \{1, 2, 5, 6, 8\}, C_h = \{2, 7, 9, 10\}, C_j = \{1, 2, 5\}, C_k = \{2, 4, 8, 9, 10\}, C_l = \{1, 4, 8, 9\}, C_m = \{1, 2, 4, 5, 7, 8, 9\}$, 所有节点能量相同. 以节点 d 为例, 节点 d 的邻居节点及检测到的可用信道情况如图 3 所示. 构建节点 d 的二分图, 从中选择最大边团 g_{d,j^*} , 其中, $j^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq j \leq num_d} |x_{d,j}| \times |y_{d,j}|$, 令 $G_d = (X_d, Y_d, Z_d) = g_{d,j^*}$, 则 $X_d = \{a, e, g\}, Y_d = \{1, 2, 5\}$, 节点权重 $\omega_d = 3 \times 3 + 0.25 = 9.25$, 如图 4 所示.

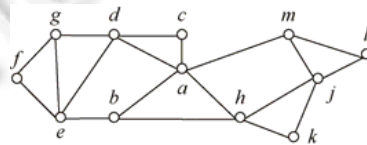


Fig.2 Network topology

图 2 网络拓扑图

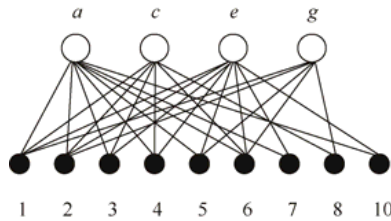


Fig.3 Relation graph of node d 's neighbors and available channels

图 3 节点 d 的邻居节点及可用信道关系图

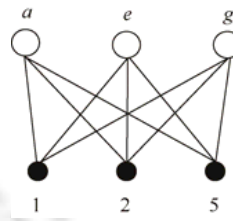


Fig.4 Maximum edge biclique of node d

图 4 节点 d 的最大边团

2.2 分簇协议

将网络中的节点分簇, 就是按照一定的规则将网络中的节点划分成不同的逻辑组合. NSAC 算法如下.

NSAC 算法.

检测剩余能量

E_i

频谱感知

C_i

广播信息

$\{E_i, C_i\}$

1. 每个状态为“未分簇”的节点 CR_i 构建二分图并计算权重

$$\omega_i(X_i, Y_i) = |X_i| \times |Y_i| + \frac{E_i}{E_i + \sum_{j \in X_i} E_j}$$

2. 构建备选簇首集合

$\text{Max}W = \{CH_1, CH_2, \dots, CH_m\}$

3. 剔除备选簇首集合中多余簇首

for $i, j = 1:m, i \neq j$ do

if $CH_i \in X_{CH_j}$ then

if $|Y_{CH_i}| > |Y_{CH_j}|$ then

将 CH_j 从集合 $\text{Max}W$ 中剔除

else

将 CH_i 从集合 $\text{Max}W$ 中剔除

end if

end if

end for

4. 将备选簇首集合中的节点设置为簇首,并标记为“已分簇”

5. 状态为“未分簇”的节点 CR_i 加入到邻居簇首所在簇

for $i = 1:n$ do

if 节点 CR_i 的状态为“未分簇” then

if $CH_j \in N_{CR_i}$ and $CR_i \in X_{CH_j}$ then

节点 CR_i 加入到任意符合该条件的簇首 CH_j 所在簇,并标记为“已分簇”

elseif N_{CR_i} 为空集 then

节点 CR_i 成为簇首,并标记为“已分簇”

end if

end if

end if

end for

6. 如果网络中存在状态为“未分簇”的节点,则从状态为“未分簇”的节点的邻居节点集合中剔出状态为“已分簇”的邻居节点,转至步骤 1,否则,分簇过程结束.

首先进行初始化过程,每个节点检测自身的剩余能量和可用信道的信息并将其广播.分簇开始时,所有节点的状态均为“未分簇”;每个节点构建二分图并计算权重;权重最大且状态为“未分簇”的节点构成备选簇首集合;剔除备选簇首集合中多余的簇首;将备选簇首集合中所有节点设置为簇首,并标记其状态为“已分簇”;网络中状态为“未分簇”的节点 CR_i 如果其邻居节点集合 N_i 中存在簇首 CH 使得 $CR_i \in X_{CH}$,则节点 CR_i 加入到任意符合该条件的簇首所在簇,并标记其状态为“已分簇”;如果其邻居节点集合 N_i 为空集,则设置节点 CR_i 为簇首,并标记其状态为“已分簇”;如果网络中所有节点的状态均为“已分簇”,则分簇过程结束,否则,从状态为“未分簇”的节点的邻居节点集合中剔出状态为“已分簇”的邻居节点,更新状态为“未分簇”的节点的权重;对状态为“未分簇”的节点进行再次分簇.分簇具体流程如图 5 所示.

注意:(1) 通信复杂度:从上述协议描述不难看出,NSAC 分簇过程中无需中心节点的集中协调,所以 NSAC 是一个完全分布的低通信开销协议.(2) 计算复杂度:NSAC 的主要计算复杂度来源于搜索最大边团

(NP-hard 问题^[17]).本文中分布式节点采用文[17]的高效近似算法,算法复杂度为 $O(n^3)$,为此NSAC协议具有多项式时间复杂度.

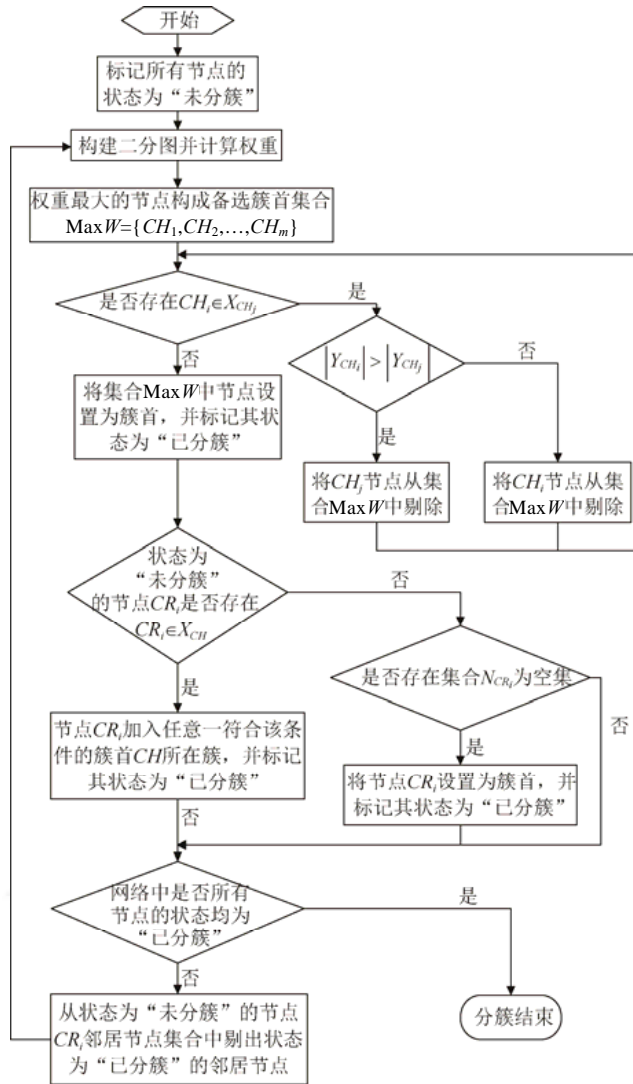


Fig.5 Flowchart of the clustering process

图5 分簇流程图

举例说明.以图2中节点为例,节点权重见表1.所有节点中,节点b的权重最大, $MaxW=\{b\}$;节点b成为簇首,标记“已分簇”,节点a和节点e的邻居节点中包括节点b,且 $a \in X_b, e \in X_b$,则节点a和节点e加入簇首b所在簇并标记“已分簇”.

更新状态为“未分簇”的节点的邻居节点集合和权重, $MaxW=\{l,m\}$,其中, $m \in X_l, |Y_{CH_l}| > |Y_{CH_m}|$,则 $MaxW=\{l\}$,l节点成为簇首,标记“已分簇”,节点m的邻居节点中包括l节点,且 $m \in X_l$,则节点m加入l节点所在簇并标记“已分簇”.

更新状态为“未分簇”的节点的邻居节点集合和权重, $MaxW=\{d\}$,节点d成为簇首,标记“已分簇”,节点c和节点g的邻居节点中包括节点d,且 $c \in X_d, g \in X_d$,则节点c和节点g加入节点d所在簇并标记“已分簇”.

更新状态为“未分簇”的节点的邻居节点集合和权重, $MaxW=\{h,k\}$,其中, $k \in X_h, |Y_{CH_h}| > |Y_{CH_k}|$,则 $MaxW=\{h\}$,节点h成为簇首,标记“已分簇”,节点k的邻居节点中包括节点h,且 $k \in X_h$,则节点k加入节点h所在簇并标记“已分簇”,节点f的邻居节点的集合为空,则节点f成为簇首,并标记为“已分簇”.

更新状态为“未分簇”的节点的邻居节点集合和权重, $MaxW=\{j\}$,j节点成为簇首,并标记为“已分簇”.

所有节点的状态均为“已分簇”,分簇结束.

Table 1 Weights of nodes

表1 节点权重

CR	X_i	Y_i	w_i	CR	X_i	Y_i	w_i
a	{b,m}	{1,2,4,5,7}	10.3	g	{d,e}	{1,2,5}	6.3
b	{a,e}	{1,2,3,4,5,7}	12.3	h	{a,b}	{2,7}	4.3
c	{a}	{1,2,3,4,6}	5.5	j	{m}	{1,2,5}	3.5
d	{a,e,g}	{1,2,5}	9.25	k	{h}	{2,9,10}	3.5
e	{b,d,g}	{1,2,5}	9.25	l	{m}	{1,4,8,9}	4.5
f	{e}	{3,6,7,10}	4.5	m	{a,j}	{1,2,5}	6.3

网络被分成6个簇,如图6所示,簇内成员及对应的簇内可用信道分别为{a,b,e},{1,2,3,4,5,7};{l,m},{1,4,8,9};{c,g,d},{1,2};{h,k},{2,9,10};{f},{3,6,7,8,10};{j},{1,2,5}.

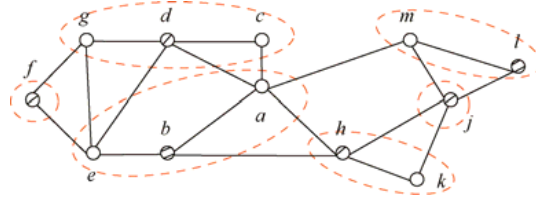


Fig.6 Network cluster structure

图 6 网络簇结构

3 性能分析

3.1 网络拓扑结构变化概率分析

网络拓扑结构改变的条件为某一个簇的公共可用信道全部被主用户占用.

假设网络中存在 k 个簇,每个簇内包含 m_k 个公共可用信道, n_k 个节点.簇 q 内信道 i 不可用的概率为 $P_{unavailable,i}$.

$$P_{unavailable,i} = 1 - \prod_{j=1}^{n_q} P_{available,i,j}$$

簇 q 重新划分的概率为 $P_{rc,q}$.

$$P_{rc,q} = \prod_{i=1}^{m_q} P_{unavailable,i} = \prod_{i=1}^{m_q} \left(1 - \prod_{j=1}^{n_q} P_{available,i,j} \right)$$

网络拓扑结构变化的概率为 P_{rc} .

$$P_{rc} = \sum_{q=1}^k P_{rc,q} = \sum_{q=1}^k \left[\prod_{i=1}^{m_q} \left(1 - \prod_{j=1}^{n_q} P_{available,i,j} \right) \right]$$

为了提高网络的稳定性,降低网络拓扑结构变化概率 P_{rc} ,则需要减少网络中簇的数量,增加簇内的公共可用信道数,减少簇内节点数.簇内的公共可用信道数和簇内节点数两者之间是负相关.所以可以将条件简化为减少网络中簇的数量,增加簇内的公共可用信道数.然而减少网络中簇的数量与增加簇内公共可用信道数是相互矛盾的条件.当网络中节点数量一定时,若减少网络中簇的数量,则需要增加每一个簇的节点数量.随着簇内节点数的增加,簇内的公共可用信道数就会减少.为了降低网络拓扑结构变化概率 P_{rc} ,需要权衡簇的数量与簇内公共可用信道数的关系,即同时最大化簇内节点数与公共可用信道数.

3.2 网络剩余能量分析

假设网络中节点的簇结构划分结束之后,网络中的频谱在一个周期内不会发生变化,可以进行稳定的数据传输,一个周期结束后网络频谱变化.频谱变化时,网络中各个簇判断簇内公共可用信道是否全部被占用,若无该现象则下一个周期进行稳定的数据传输,否则重新划分簇结构.假设网络总能量为 nE_0 .在一次分簇过程中,网络中每个非簇首节点消耗的能量为 e_1 ,每个簇首节点消耗的能量= $e_1 \times$ 簇内节点数;在节点进行稳定的数据传输的过程中,网络中每个非簇首节点消耗的能量为 e_2 ,每个簇首节点消耗的能量= $e_2 \times$ 簇内节点数.令网络中节点完成一次簇结构的划分平均需要消耗总能量为 E_1 ,在一个周期内完成稳定传输数据平均所需消耗总能量为 E_2 ,用 r 表示周期.定义网络寿命为从网络运行开始至网络中第一个节点死亡所经历的时间.网络中剩余能量为 nE .

$$\begin{aligned} nE &= nE_0 - (P_{rc}(E_1 + E_2) + (1 - P_{rc})E_2)r, \\ nE &= nE_0 - (P_{rc}E_1 + E_2)r, \\ nE &= -P_{rc}E_1r - E_2r + nE_0. \end{aligned}$$

当网络总能量 nE_0 一定时,拓扑结构变化概率 P_{rc} 的值越大,网络能量消耗越快,网络寿命越短.

4 仿真验证

本文采用 Matlab 对 NSAC 进行仿真,为验证该协议在延长网络寿命和降低网络拓扑结构变化频率方面的优越性,故选取 CogLEACH 协议^[11]、CSAC 协议^[12]进行对比实验.在 100m×100m 的区域中均匀随机分布 $n=100$ 个认知节点,2 个主用户.传感节点的通信半径为 15m.主用户的通信范围覆盖整个认知无线传感器网络.网络中存在 7 条可用信道,每个节点每次可检测到 5 条可用信道,两个主用户随机占用任意两条可用信道.参数赋值如下: $E_0=3J, e_1=0.049J, e_2=0.001J$.为了保证对比的公平性,相同环境下进行了 50 次仿真实验,取 50 次实验结果的平均值作为对比结果.

死亡节点数与周期之间的关系如图 7 所示.由图可知网络寿命:CogLEACH<CSAC<NSAC.网络剩余能量与周期之间的关系如图 8 所示.由图可知 NSAC 能量消耗最慢,CSAC 能量消耗最快.这是因为 NSAC 中,簇首选择过程需要考虑节点剩余能量,以达到负载均衡的效果,进而延长网络寿命.

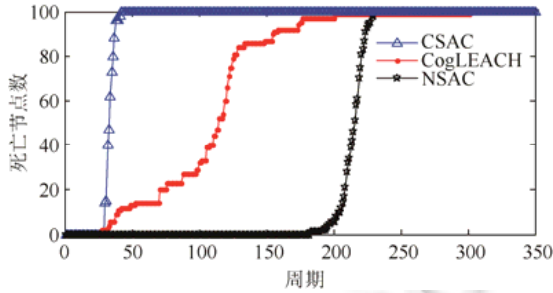


Fig.7 Number of dead nodes versus time
图 7 死亡节点数随时间变化

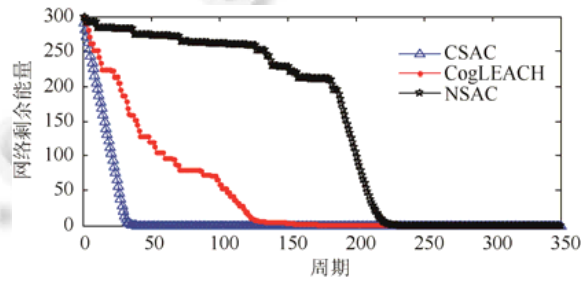


Fig.8 Remaining network energy versus time
图 8 网络剩余能量随时间变化

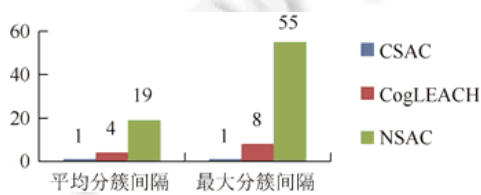


Fig.9 Statistical diagram of clustering intervals
图 9 分簇间隔统计

用两次分簇过程间隔的周期数来表示网络拓扑结构变化.图 9 为分簇间隔统计图.因为 CSAC 是基于成对约束的分簇协议,簇内不存在公共可用信道,所以网络拓扑结构持续变化,分簇间隔为 1.由图可知 NSAC 的平均分簇间隔大于 CogLEACH 和 CSAC 的平均分簇间隔.NSAC 网络的拓扑结构变化频率要低于 CogLEACH 和 CSAC.NSAC 的最大分簇间隔远大于 CogLEACH 和 CSAC 的最大分簇间隔.NSAC 网络保持稳定的时间相对于 CogLEACH 和 CSAC 更长,网络稳定性更高.

这是因为在组网过程中,NSAC 充分考虑簇内公共可用信道的备份问题以应对频谱动态性对网络拓扑结构的影响.

5 总结

本文提出了一种考虑网络稳定性的认知无线传感器网络分簇协议——NSAC.NASC 的创新在于簇首选择阶段,每个节点根据邻居节点集合和可用信道构建最大边团,根据最大边团中节点的剩余能量、节点数量和公共可用信道数计算节点权重.选择权重大的节点成为簇首,其他节点加入邻居簇首所在簇.由于分簇过程中充分考虑了网络能耗和频谱动态性,网络的寿命和稳定性得到显著提升.仿真结果显示,NSAC 分簇协议相对于其他协议在延长网络寿命和提升网络稳定性方面有较大进步.

References:

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks, 2002,38(4):393-422.

- [2] Boonsongsrikul A, Kocijancic S, Suppharangsarn S. Effective energy consumption on wireless sensor networks: Survey and challenges. In: Proc. of the 2013 36th Int'l Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics. 2013. 469–473.
- [3] Akan OB, Karli O, Ergul O. Cognitive radio sensor networks. Network IEEE, 2009,23(4):34–40.
- [4] Mishra SM, Sahai A, Brodersen RW. Cooperative sensing among cognitive radios. In: Proc. of the 2006 IEEE Int'l Conf. on Communications. 2006. 1658–1663.
- [5] Chi X, Meng Z, Wei L. Joint spatial-temporal access scheme of multi-hop cognitive radio sensor networks. Int'l Journal of Sensor Networks, 2017,25(1):1–12.
- [6] Zheng M, Chen L, Liang W. Energy-Efficiency maximization for cooperative spectrum sensing in cognitive sensor networks. IEEE Trans. on Green Communications and Networking, 2017,1(1):29–39.
- [7] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communication, 2002,1(4):660–670.
- [8] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):366–379.
- [9] Kumarawadu P, Dechene DJ, Luccini M. Algorithms for node clustering in wireless sensor networks: A survey. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information and Automation for Sustainability. IEEE, 2008. 295–300.
- [10] Rana P, Sharma K. Recent advancements in clustering protocols for wireless sensor network. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computing, Communication and Networking Technologies. IEEE Computer Society, 2017. 1–7.
- [11] Eletreby RM, Elsayed HM, Khairy MM. CogLEACH: A spectrum aware clustering protocol for cognitive radio sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. IEEE, 2014. 179–184.
- [12] Zhang HZ, Zhang ZY, Yuen C. Energy-Efficient spectrum-aware clustering for cognitive radio sensor networks. Science Bulletin, 2012,57:3731–3739.
- [13] Ozger M, Fadel E, Akan OB. Event-to-Sink spectrum-aware clustering in mobile cognitive radio sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2016,15(9):2221–2233.
- [14] Bradonjic M, Lazos L. Graph-Based criteria for spectrum-aware clustering in cognitive radio networks. Ad Hoc Networks, 2012, 10(1):75–94.
- [15] Shah GA, Alagoz F, Fadel EA. A spectrum-aware clustering for efficient multimedia routing in cognitive radio sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014,63(7):3369–3380.
- [16] Mustapha I, Ali BM, Rasid MFA. An energy-efficient spectrum-aware reinforcement learning-based clustering algorithm for cognitive radio sensor networks. Sensors, 2015,15(8):19783–19818.
- [17] Hochbaum D. Approximating clique and biclique problems. Journal of Algorithms, 1998,29(1):174–200.



郑萌(1983—),男,辽宁鞍山人,博士,研究员,CCF 专业会员,主要研究领域为认知无线传感器网络。



梁炜(1974—),女,博士,研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为工业无线传感器网络。



陈思(1994—),女,硕士生,主要研究领域为认知无线传感器网络。



王楚晴(1992—),女,硕士生,主要研究领域为认知无线传感器网络。