



基于节点持续传输准则的认知传感器网络信道分配策略

李鑫滨, 黄泽群, 韩松, 陈剑美

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 在异构分级式认知传感器网络中, 为提高数据分组的传输成功率, 提出将节点划分为具备持续传输条件和不具备持续传输条件两类, 两类节点分别以牺牲较多能耗和分配较优信道的方式提高数据分组的传输成功率, 并由此得到一种集中式信道分配策略。为了降低节点在信息传输过程中每比特平均能耗, 对数据分组自适应调节机制进行了优化, 确保不具备持续传输条件的节点得到最优的传输数据分组大小。仿真结果证明, 提出的分配策略和优化机制能够有效提高能量的使用效率, 改善网络性能。

关键词: 认知传感器网络; 传输条件; 信道分配策略; 能量使用效率

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015062

Channel Assignment Strategy Based on the Sustained-Transmission Rule of Nodes in Cognitive Radio Sensor Network

Li Xinbin, Huang Zequn, Han Song, Chen Jianmei

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the success rate of data packet transmission in heterogeneous and hierarchical cognitive radio sensor network, the nodes were divided into sustained-transmission and non-sustained-transmission conditions. The ways of improving the success rate of data packet transmission are more energy consumption and better channel assignment, so that there is a type of centralized channel assignment strategies. At the same time, in order to reduce the energy consumption per bit in information transmission process of nodes, the packet size adaptation mechanism was optimized, ensuring the optimal packet size of non-sustained-transmission nodes. Simulation results demonstrate that the channel assignment strategy and the optimization mechanism improve the efficiency of energy utilization and the performance of network.

Key words: cognitive radio sensor network, transmission condition, channel assignment strategy, efficiency of energy utilization

1 引言

传统的无线传感器网络普遍工作在日益拥挤的 ISM

频段, 为解决网络中频谱资源匮乏的问题, 可在传感器网络中引入认知无线电技术, 实现对频谱资源的有序竞争访问和高效共享的动态频谱分配机制^[1,2]。引入认知无线电技

收稿日期: 2014-12-01; 修回日期: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61172095)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61172095)

论文引用格式: 李鑫滨, 黄泽群, 韩松等. 基于节点持续传输准则的认知传感器网络信道分配策略. 电信科学, 2015062

Li X B, Huang Z Q, Han S, et al. Channel Assignment Strategy Based on the Sustained-Transmission Rule of Nodes in Cognitive Radio Sensor Network. Telecommunications Science, 2015062

术的无线传感器网络称为 CRSN (cognitive radio sensor network, 无线认知传感器网络)。CRSN 能够减少节点因竞争信道而造成的等待、冲突和能量损耗, 提高频谱资源的利用效率^[3]。

CRSN 在分享授权频谱时不能对 PU (primary user, 主用户) 造成有害干扰, 因此其动态频谱接入过程需要考虑公共控制信道的选择、数据信道的分配以及传输帧长度的确定等问题^[4]。参考文献[5]基于图论给出了具有顽健性的 CRSN 信道分配方法, 优化了网络节点的通信范围, 使网络具备在 PU 到达后通过备选信道维持节点间通信的能力, 但忽略了网络中存在的干扰问题。参考文献[6]给出了在 CRSN 中节点避免对 PU 造成有害干扰的判断条件, 以信道可占用时长与传感器节点的业务时长实现最佳匹配为原则完成信道分配, 其中可占用时长规定为固定平均时长, 实际该时长应服从一定概率分布。参考文献[7]指出网络生存时间制约着传感器网络的性能, 因此在降低系统能量开销的同时需平衡网络中节点间的剩余能量, 并由此提出一种平衡网络能量状况的树状路由协议。参考文献[8]在 CRSN 中按照最小化节点间剩余能量方差的准则完成集中式信道分配任务, 以达到平衡节点间剩余能量、延长网络生存时间的目的。参考文献[9]指出在传感器网络中, 系统存在增大传输数据分组以降低控制信息开销与减小传输数据分组以降低误分组率之间的矛盾, 因此以优化系统传输能耗为目标, 提出一种动态调节数据分组大小的方法, 并证明了数据分组大小的动态调节在传感器网络中的可行性。参考文献[10]在 CRSN 中提出了数据分组自适应调节机制, 根据信道状况和节点信息调节传输数据分组大小, 优化网络中信息传输的 EPB (energy-consumption per bit, 每比特平均能耗)。

本文依据节点持续传输准则将节点按传输条件划分为两类, 具备持续传输条件的节点能够以牺牲较多传输能耗为代价提高数据分组的传输成功率, 避免了节点在不具备持续传输条件下因重复传输造成的资源浪费。但是对于能量有限的传感器网络来说, 提高能量使用效率是至关重要的^[11], 因此本文以 PU 平均到达次数作为评估信道优劣的标准, 基于节点持续传输准则给出了一种集中式信道分配策略, 同时对数据分组自适应调节机制进行了优化。

2 系统模型

2.1 网络配置

为了更好地实现对本地信道的动态管理和对控制信

息的传输, CRSN 采用异构分级式网络拓扑结构, 如图 1 所示。每个簇内包含一个 CH (cluster head, 簇首) 和若干 CM (cluster members, 簇成员)。CH 具备较强的计算、存储和通信覆盖能力, 并配有动态频谱管理模块完成集中式信道分配任务。CM 配有认知无线电收发器, 具备动态配置通信参数接入指定信道完成传输任务的能力。

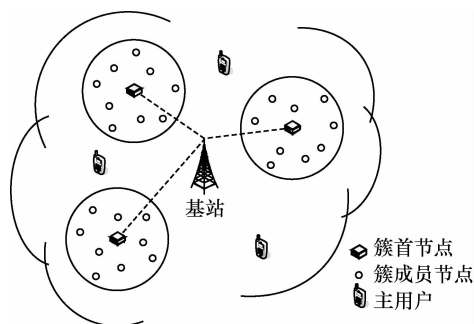


图 1 CRSN 拓扑结构

同时每个簇内均包含固定的公共控制信道和若干个不同的数据信道, 公共控制信道用来实现 CH 与 CM 间的控制信息交换, CM 通过数据信道将采集获取的环境信息发送给 CH。本文只考虑单个簇在单一移动 PU 影响下的信道分配和能量损耗问题, 并且一个数据信道至多分配给一个传感器节点, 同时认为 PU 位置等信息已在频谱感知阶段由 CH 间的协作感知完成。

系统建模为时隙模型^[10], 如图 2 所示。每帧由 $L+1$ 个时隙构成, 起始时隙包含接入控制信息, 其余 L 个时隙为数据信息。因此数据分组中所含数据量为 $B \times T \times L$, 其中 B 为数据信息传输速率, T 为数据时隙持续时长, L 为数据分组所占时隙个数。



图 2 时隙模型

本文根据避免对 PU 造成有害干扰的判断条件^[12]对传感器节点进行划分, 即节点持续传输准则。当节点 CM_i 与 PU 在相同信道共同完成传输任务时, 既能满足传输需求又能避免对 PU 造成有害干扰, 那么称该节点具备持续传输条件, 即满足:

$$\frac{SINR_{\min} \times (N_0 + NP)}{G_i^{\text{ch}}} \leq \frac{I_{\text{safe}}}{G_i^{\text{pu}}} \quad (1)$$

其中, $SINR_{\min}$ 为 CH 所需的最小信干噪比, N_0 为无线



环境中的高斯白噪声功率谱密度, NP 为 PU 通信对 CH 造成的干扰, I_{sidc} 为 PU 的干扰门限, $G_i^{\text{ch}}, G_i^{\text{pu}}$ 分别表示节点 CM_i 到 CH、PU 的信道增益; 反之, 称该节点不具备持续传输条件。

2.2 能量损耗模型

在簇内 CH 拥有充足能量, 而 CM 的初始能量 E_m 有限, 因此只有 CM 受到能耗问题的约束。本文采用参考文献[12]给出的能量损耗模型, 节点 CM_i 在传输、接收信息时产生的能耗可分别用 $E_i^{\text{tr}}(l, n)$ 和 $E_i^{\text{rv}}(l, n)$ 表示, 即:

$$\begin{cases} E_i^{\text{tr}}(l, n) = (E_n^{\text{cir}} + \varepsilon_n d_i^2) \times B \times T \times l, & n=1, 2 \\ E_i^{\text{rv}}(l, n) = E_n^{\text{cir}} \times B \times T \times l, & n=1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, E_n^{cir} 为射频电路平均能耗, ε_n 为放大电路平均能耗系数, d_i 为节点 CM_i 与 CH 间的距离, l 为信息所占时隙个数。 $n=1$ 表示该节点不具备持续传输条件, $n=2$ 表示该节点具备持续传输条件, 节点在公共控制信道完成控制信息交换过程中, n 的取值恒为 1。

3 信道分配和数据分组自适应调节的优化

在 CRSN 中, 当 CM 有传输需求时, 通过公共控制信道向 CH 发送请求信息, CH 根据信道状态和接收到的节点信息完成信道分配和数据分组调节, 并将结果通过公共控制信道反馈给 CM, CM 监听到反馈信息后, 根据分配结果完成传输任务或进入休眠状态节约能耗。

3.1 主用户模型

PU 建模为马尔可夫更新过程, PU 离开信道、到达信道分别用信道空闲 (idle/0) 和忙碌 (busy/1) 表示, 如图 3 所示。信道的状态变化默认只发生在相邻时隙间, 且不同信道间不会产生相互干扰。

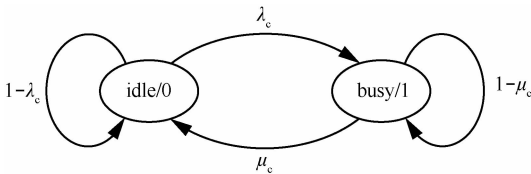


图 3 PU 模型

λ_c 、 μ_c 分别表示 PU 到达和离开信道 c 的概率。那么信道 c 初始状态为空闲时, PU 在 $(0, t]$ 时间段内到达信道 c 的平均次数可用 N_c^{pu} 表示。 N_c^{pu} 反映了信道 c 被 PU 占用的频度, 因此本文以 PU 平均到达次数 N_c^{pu} 作为评估信道优劣的标准。

$$N_c^{\text{pu}} = \frac{\lambda_c \mu_c}{\lambda_c + \mu_c} t + \frac{\lambda_c^2}{(\lambda_c + \mu_c)^2} [1 - e^{-(\lambda_c + \mu_c)t}] \quad (3)$$

3.2 信道分配

将节点依据持续传输准则划分后, 若簇内节点在传输状态下 PU 到达, 那么不具备持续传输条件的节点需及时退出信道, 且认为当前传输数据分组丢失, 而具备持续传输条件的节点则在完成当前数据分组传输后退出信道, 缓解簇内节点重复传输的状况, 同时改善由节点重复传输造成的网络时延。按上述传输原则得到如下的集中式信道分配策略。

设空闲信道数量为 N , 有传输需求节点的数量为 M , 不具备持续传输条件的待分配节点的数量为 a , 具备持续传输条件的待分配节点的数量为 b , 即满足 $a+b \leq N$, 具体的信道分配步骤如下。

步骤 1 待分配信道和待分配节点的选择: 若 $M \leq N$, 则在 N 个信道中选择 M 个最好的信道作为待分配信道, 有传输需求的节点均作为待分配节点, 此时 $a+b=M$; 若 $M > N$, 则在 M 个有传输需求的节点中选择剩余能量最多的 N 个节点作为待分配节点, 空闲信道均作为待分配信道, 此时 $a+b=N$ 。

步骤 2 待分配信道分组: 在待分配信道中选择 PU 平均到达次数 N_c^{pu} 最小的 a 个待分配信道构成组 Grp1, 剩余的 b 个待分配信道构成组 Grp2。满足 Grp1 中任意信道的 N_c^{pu} 均不大于 Grp2 中信道的 N_c^{pu} , 即 $N_{\text{Grp1}}^{\text{pu}} \leq N_{\text{Grp2}}^{\text{pu}}$ 。

步骤 3 信道分配: 将 Grp1 中的待分配信道分配给不具备持续传输条件的待分配节点, 将 Grp2 中的待分配信道分配给具备持续传输条件的待分配节点。 Grp1、Grp2 中信道分配均需满足 N_c^{pu} 较少的信道分配给剩余能量较小节点的分配原则。

步骤 4 分配到信道的节点配置通信参数接入指定信道完成传输任务, 未分配到信道的节点进入休眠状态节约能耗。

由于簇内一定比例节点的能量耗尽会造成整个簇的信息采集功能失效, 即网络生存时间到达。因此, 为了避免节点因频繁通信或连续工作在持续传输条件下造成的大量能量损耗, 本文基于节点持续传输准则提出的信道分配策略考虑了平衡簇内节点间剩余能量的分配方法, 将节点间的剩余能量维持在一个相对平衡的状态, 同时所提出的分配策略能够提高数据分组的传输成功率和能量的使用效率。

3.3 优化数据分组自适应调节

在簇内, 节点 CM_i 的控制信息交换能耗可用 E_i^{control} 表示, 其中包括发送请求信息以及接收反馈信息产生的能耗, K_1 表示请求信息的数据量, K_2 表示反馈信息的数据量, 则 E_i^{control} 为^[10]:

$$E_i^{\text{control}} = (E_n^{\text{cir}} + \varepsilon_n d_i^2) \times K_1 + E_n^{\text{cir}} \times K_2, n=1 \quad (4)$$

设数据分组占用 $L \in [L_{\min}, L_{\max}]$ 个时隙, 则节点 CM_i 在信道 c 上完成数据传输任务时的能耗期望及成功传输的数据量可分别用 $\bar{E}_{ic}^{\text{data}}$ 和 $K_{ic}^{\text{success}}(L, n)$ 表示。

$$\bar{E}_{ic}^{\text{data}}(L, n) = \sum_{l=1}^L E_i^{\text{data}}(l, n) \times P_c(l, n), n=1, 2 \quad (5)$$

$$K_{ic}^{\text{success}}(L, n) = P_c(l, n) \times B \times T \times l, l=L, n=1, 2 \quad (6)$$

其中, $P_c(l, n)$ 表示节点 CM_i 在信道 c 完成传输任务时的发生概率。

$$P_c(l, n) = \begin{cases} (1-\lambda_c)^l \lambda_c, 1 \leq l \leq L-1, n=1 \\ (1-\lambda_c)^l, l=L, n=1 \\ 0, 1 \leq l \leq L-1, n=2 \\ 1, l=L, n=2 \end{cases} \quad (7)$$

在信道分配完成后节点已有固定匹配的数据信道, 因此可用 $\bar{E}_{ic}^{\text{data}}(L, n)$ 和 $K_{ic}^{\text{success}}(L, n)$ 分别表示节点 CM_i 在所分配的信道上完成数据传输任务时的能耗期望及成功传输的数据量。

由于在 CRSN 中信道状态随 PU 的占用情况动态变化, 同时簇内节点是否具有传输需求也是动态变化的, 因此待分配信道和待分配节点具有时变性。为了优化簇内节点在网络生存时间内的 EPB, CH 将根据信道分配结果并结合节点具备不同传输条件的特点, 对簇内节点的传输数据分组大小进行动态调节, 即数据分组自适应调节过程。其中, 不具备持续传输条件节点的 EPB 可用 $\overline{EPB}(L)$ 表示。

$$\overline{EPB}(L) = \left(\sum_{i=1}^M E_i^{\text{control}} \times Q + \sum_{j=1}^a \bar{E}_j^{\text{data}}(L, n) \right) / \sum_{j=1}^a K_j^{\text{success}}(L, n), n=1 \quad (8)$$

式(8)中 $Q=a/(a+b)$, $\bar{E}_j^{\text{data}}(n)$, $K_j^{\text{success}}(n)$ 分别表示不具备持续传输条件节点在所分配信道上的能耗期望和成功传输的数据量, 那么不具备持续传输条件节点的最优传输数据分组大小 $L_{\text{op}} = \arg \min \overline{EPB}(L)$ 。同时为保证簇内分配到信道节点的传输数据分组大小一致, 对具备持续传输条件节点的数据分组大小按 L_{op} 完成配置, 并将配置结果同信道分配结果通过公共控制信道反馈给请求节点。由于本文在信道分配过程中将性能最好的待分配信道分配给不具备持续传输条件的待分配节点, 因此优化后的数据分组自适应调节机制降低了每帧中控制信息的占比, 减小了节点用于控制信息交换的能量损耗, 提高了节点能量的使用效率。

4 仿真结果

本文在异构分级式 CRSN 中, 从簇内节点每比特平均

能耗、每帧中控制信息占比以及网络生存时间内的数据信息传输量 3 个方面对所提出的信道分配策略进行了性能仿真和分析, 并与参考文献[10]中的方法进行了比较。仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

参数名称	参数值
空闲信道数量 N	20
认知传感器节点数量 M	50
有传输需求节点的占比	0.6
PU 到达概率 λ	(0, 0.5]
PU 离开概率 μ	[0.3, 0.8]
数据传输速率 B	40 kbit/s
数据时隙持续时长 T	4 ms
CM 请求信息 K_1 /CH 反馈信息 K_2	20 byte
CM 数据分组长度 L	[20, 128] byte
CM 初始能量 E_m	1 J
通信参数配置能耗 E^{change}	10 μ J/项/次
射频电路平均能耗 $E_1^{\text{cir}}/E_2^{\text{cir}}$	40/70 nJ/bit
放大电路平均能耗系数 $\varepsilon_1/\varepsilon_2$	0.1/0.3 nJ/bit/m ²
CM_i 与 CH 间的距离 d_i	(0, 50) m

4.1 具备持续传输条件节点的占比

图 4 为在 PU 的不同干扰门下, 具备持续传输条件节点的占比随 CH 所需最小信干噪比变化的曲线。图 5 为在 CH 所需的不同最小信干噪比下, 具备持续传输条件节点的占比随 PU 干扰门限变化的曲线。能够看出, 簇内存在具备持续传输条件的节点, 且该类节点的占比随 CH 所需最小信干噪比的提高以及 PU 干扰门限的降低, 呈明显的下降趋势。

4.2 信道分配和数据分组自适应调节的优化

图 6 分别比较了基于节点持续传输准则的随机信道分配下的具备持续传输条件节点(RC)、不具备持续传输

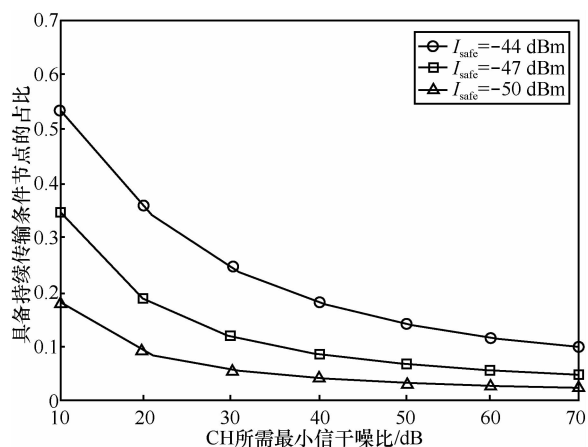


图 4 持续传输节点占比与 CH 所需最小信干噪比的关系

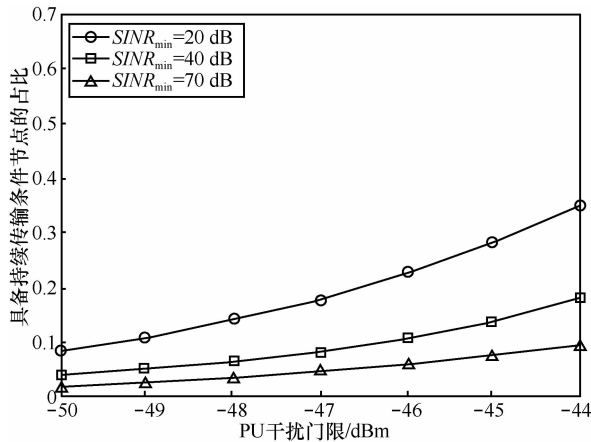


图5 持续传输节点占比与 PU 干扰门限的关系

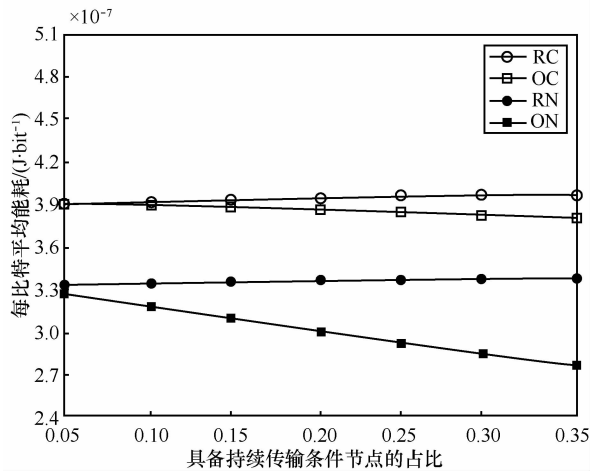


图6 持续传输节点占比与节点每比特平均能耗的关系

条件节点(RN)的 EPB,以及本文提出的信道分配方法下的具备持续传输条件节点(OC)、不具备持续传输条件节点(ON)的 EPB。明显看出,两种分配情况下具备持续传输条件节点的 EPB 均高于不具备持续传输条件的节点,这是由于该类节点以牺牲能耗为代价,提高了数据分组的传输成功率。虽然在两种信道分配下均采用了优化的数据分组自适应调节机制,但在本文提出的信道分配方法下,由于不具备持续传输条件的节点能够分配到更好的信道,因此节点的 EPB 呈明显的下降趋势,而在随机分配下则基本保持不变。

图7比较了随机信道分配(RCA)、本文提出的信道分配(OCA)方法以及参考文献[10]中的分配和调节机制(RA)在信息传输过程中的 EPB。可见,本文提出的 OCA 方法略优于 RA 方法,同时两者均优于 RCA 方法,这是由于 RCA 方法增加了簇内节点能耗,但并没有有效地提高数据分组的传输成功率,因此节点的 EPB 呈明显的上升趋势。

由于每帧中控制信息的占比反映了簇内节点能量的

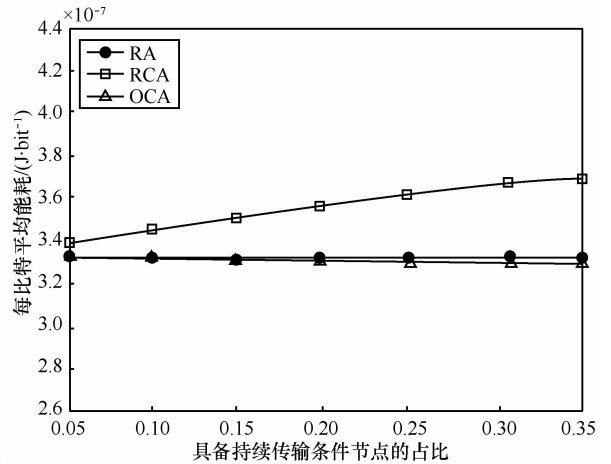


图7 持续传输节点占比与节点每比特平均能耗的关系

使用效率,因此图8从每帧中控制信息占比的角度对不同方法进行了比较。RA 方法的控制信息占比保持不变,RCA 方法的控制信息占比逐渐高于 RA 方法。而在 OCA 方法的控制信息在每帧中的占比随簇内具备持续传输条件节点占比的提高而减小,降低了节点因将能量过多地用于控制信息传输而造成的能量浪费,提高了能量的使用效率。

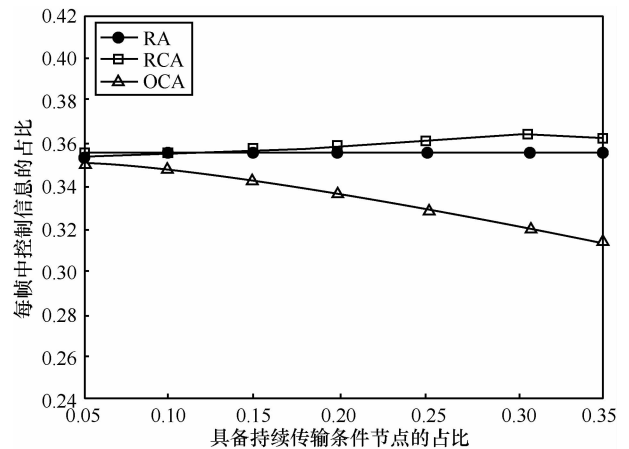


图8 持续传输节点占比与每帧中控制信息占比的关系

4.3 网络生存时间内的数据信息传输量

本文认为簇内存活节点数量小于 60%时,整个簇的信息采集功能失效,即网络生存时间到达。图9为网络生存时间内的数据信息传输量,与 RA 方法相比,随着簇内具备持续传输条件节点占比的提高,OCA 方法能够完成更多的数据传输任务,而 RCA 方法的数据传输信息量则明显低于 RA 方法。这是由于本文基于节点持续传输准则优化了信道分配和数据分组自适应调节机制,使节点能量能够更多地用于数据信息的传输,同时在信道分配过程中平衡了簇内节点间的剩余能量状况,改善了网络性能。

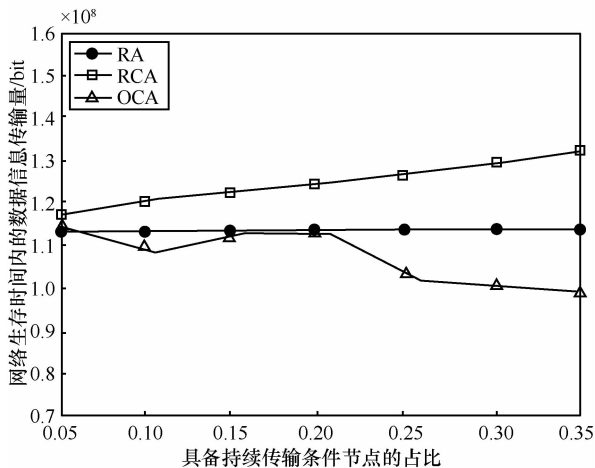


图9 持续传输节点占比与数据信息传输量的关系

5 结束语

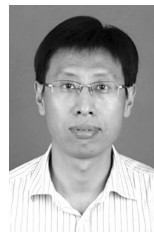
本文提出的分配策略适用于工作在无源环境下的异构分级式CRSN,即能耗问题是制约网络性能的重要因素之一。为了降低网络中节点的能量损耗,基于节点持续传输准则提出了一种集中式信道分配策略,提高了数据分组的传输成功率,平衡了簇内节点间的剩余能量状况,同时优化了数据分组的自适应调节机制,降低了信息传输过程中的EPB。仿真结果证明,本文提出的信道分配方法提高了节点的能量使用效率,改善了CRSN的性能。另外,本文在将传感器节点依据持续传输准则划分的过程中,可能会由于划分节点类型的判决条件单一,导致部分节点能量过度损耗,因此在今后的研究中有必要对节点的划分条件进行更适宜的限制和优化。

参考文献

- 1 Akan O B, Karli O, Ergul O. Cognitive radio sensor networks. *IEEE Network*, 2009, 23(4): 34~40
- 2 Ozger M, Akan O B. Event-driven spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Turin, Italy, 2013: 1483~1491
- 3 Zeng F, Tang Y, Pu J. Multichannel broadcast based on home channel for cognitive radio sensor networks. *The Scientific World Journal*, Article ID 725210, 2014: 1~6
- 4 Kim H S, Ejaz W, Al-Begain K, *et al.* Advances in cognitive radio sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Article ID 631624, 2014: 1~3
- 5 Cardei M, Mihnea A. Channel assignment in cognitive wireless sensor networks. *Proceedings of International Conference on Computing, Networking and Communications*, Honolulu, USA, 2014: 588~593

- 6 章坚武, 赵琪, 邹婧媛. 避免干扰的低能耗无线传感器网络动态频谱分配算法. *传感技术学报*, 2009, 22(10): 1481~1485
- Zhang J W, Zhao Q, Zou J Y. Algorithm of spectrum allocation for wireless sensor network based on dynamic spectrum sensing. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22 (10): 1481~1485
- 7 Han Z, Wu J, Zhang J, *et al.* A general self-organized tree-based energy-balance routing protocol for wireless sensor network. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(2): 732~740
- 8 Li X, Wang D, McNair J, *et al.* Residual energy aware channel assignment in cognitive radio sensor networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Cancun, Mexico, 2011: 398~403
- 9 Dong W, Chen C, Liu X, *et al.* Dynamic packet length control in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1172~1181
- 10 Li X, Wang D, McNair J, *et al.* Dynamic spectrum access with packet size adaptation and residual energy balancing for energy-constrained cognitive radio sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 41(1): 157~166
- 11 Romero E, Blesa J, Araujo A, *et al.* A game theory based strategy for reducing energy consumption in cognitive WSN. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Article ID 965495, 2014: 1~9
- 12 Wang Q, Hempstead M, Yang W. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices. *Proceedings of IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Reston, USA, 2006: 286~295

[作者简介]



李鑫滨,男,博士,燕山大学电气工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为认知无线电及应用、智能信息处理及故障诊断方法、电力系统智能控制及无功优化等。

黄泽群,男,燕山大学电气工程学院硕士生,主要研究方向为认知传感器网络、认知无线电中的信道分配。

韩松,男,燕山大学电气工程学院博士生,主要研究方向为认知无线电中的资源分配、Femtocell网络中的资源分配。

陈剑美,女,燕山大学电气工程学院硕士生,主要研究方向为压缩感知、认知传感器网络。