

基于生命期模型的无线传感器网络信道分配博弈算法

郝晓辰 姚宁 汝小月 刘伟静 辛敏洁

Channel allocation game algorithm based on lifetime model in wireless sensor network

Hao Xiao-Chen Yao Ning Ru Xiao-Yue Liu Wei-Jing Xin Min-Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 140101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.140101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于脏脸博弈模型的人车路口穿越行为研究

Crossing behavior of pedestrians and vehicles at unsignalized intersection based on dirty faces game

物理学报.2015, 64(12): 120201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120201>

一种无线传感器网络健壮性可调的能量均衡拓扑控制算法

Energy balance and robustness adjustable topology control algorithm for wireless sensor networks

物理学报.2015, 64(8): 080101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.080101>

基于交通流量的病毒爆发动力行为研究

Dynamical patterns of epidemic outbreaks on scale-free networks with traffic flow

物理学报.2012, 61(20): 200209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200209>

任意分集方式多输入多输出无线通信系统的统计信道建模

Statistical modeling arbitrary diversity multi-input multi-output systems

物理学报.2012, 61(18): 180101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.180101>

基于交通流量的病毒扩散动力学研究

Epidemic spreading on scale-free networks with traffic flow

物理学报.2012, 61(15): 150201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.150201>

基于生命期模型的无线传感器网络信道分配 博弈算法*

郝晓辰[†] 姚宁 汝小月 刘伟静 辛敏洁

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(2015年1月13日收到; 2015年3月3日收到修改稿)

针对无线传感器网络中节点因干扰过大导致重传能耗增加, 进而节点过早失效、网络生命期缩短的问题, 根据网络拓扑信息和路由信息设计节点的负载模型, 从而构建了节点的生命期模型. 然后利用博弈论将路径增益、交叉干扰和节点生命期等性能参数融入到效益函数中, 构建信道分配博弈模型. 理论分析证明该博弈模型存在纳什均衡. 进而运用最佳回应策略, 在所构建的信道分配博弈模型的基础上, 设计了一种优化网络生命期的抗干扰信道分配算法. 该算法使节点在选择信道时避免与网络中交叉干扰较大的节点和生命期较小的节点使用相同信道, 实现干扰小、能耗低且均衡的信道选择. 理论分析与仿真结果证明该算法最终能够快速收敛到纳什均衡, 且具有较小的信息复杂度, 从而减小算法本身的通信能耗. 同时, 该算法具有良好的抗干扰性和信道均衡性, 能够有效地延长网络生命期.

关键词: 无线传感器网络, 信道分配, 生命期模型, 博弈论

PACS: 01.20.+x, 02.50.Le, 05.65.+b, 88.05.Jk

DOI: 10.7498/aps.64.140101

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由大量体积小、成本低、具有无线通信、传感、数据处理能力的传感器节点组成^[1]. 由于缺乏对信道的合理分配, 节点间的干扰愈加严重, 进而影响数据的成功传输, 增大数据延迟. 同时干扰使节点重传数据, 造成其额外能耗增加, 使得生命期较小的节点过早失效^[2], 从而降低了网络生命期. 因此, 对于电池能源有限的无线传感器网络, 如何减少节点间的通信干扰、延长网络生命期成为亟待解决的问题.

多信道分配技术作为降低干扰的有效手段, 目前已经广泛应用于ad-hoc network^[3,4]和 wireless mesh network^[5]. 然而由于WSN能量和计算能力有限, 这些算法不能直接用于WSN中. 因此,

Zhou等^[6]提出了适用于WSN的MMSN (multi-frequency media access control for wireless sensor networks)算法, 使可用信道在两跳邻居范围内得到均匀使用, 但最终网络仍存在最大干扰节点. TMCP (tree-based multi-channel protocol)算法^[7]基于贪婪思想的启发式机理把整个网络划分成若干个同根子树, 给每个子树分配不同信道. 但该算法并没有考虑各个子树在使用同一信道时的通信干扰, 其适用性不强. 为更好地消除干扰并充分利用多信道资源, 改善抗干扰效率, Chen等^[8]充分利用网络拓扑信息和路由信息构建父子集, 进而提出了一种高效的静态分配算法GBCA (game based channel allocation). 该算法不仅考虑自己所遭受的干扰, 同时也考虑了对其他节点所造成的干扰, 高效地降低并且均衡了网络干扰. 然而, GBCA将干扰分为交叉链路干扰与干扰链路干扰, 并忽略了无法消除的交叉链路上的干扰. 但是, 具有较大交

* 国家自然科学基金(批准号: 61403336)和燕山大学青年教师自主研究计划课题A类(编号: 13LGA008)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: haoxiaochen@ysu.edu.cn

叉链路干扰的节点数据重传的概率较大, 将会消耗大量的节点能量, 造成该节点过早失效, 从而降低网络生命期. 因此, 交叉干扰的影响不容忽视. 并且上述算法的干扰模型过于理想, 无法反映距离干扰源越近干扰越严重的实际规律.

同时, 由于无线传感器节点使用电池提供能量, 使得可提供的能量相对较少且补充困难, 因此在信道分配时要尽可能地降低节点能耗, 延长网络生命期. 功率控制^[9-11]是降低能耗的有效方法. Marina等^[12]提出贪婪启发式信道分配算法, 通过功率控制来选择使网络连通且干扰较小的功率, 从而达到降低干扰减小能耗的目的. Hao等^[13]联合功率控制与信道分配技术提出了JCAPGA (joint channel allocation and power control optimal algorithm based on non-cooperative game) 算法. 他们将节点的剩余能量融合在信噪比与效益函数中, 使剩余能量小的节点选择较小的发射功率和干扰较小的信道, 从而达到降低干扰与节约能耗、延长网络生命期的目的. 但在现实应用中, 节点的发射功率是不可调整的. 并且实际上网络生命期取决于节点生命期, 而节点生命期是由节点的剩余能量和单位能耗共同决定的. 因此, 仅通过降低剩余能量小的节点的干扰, 并不能有效地延长网络生命期, 应充分考虑各节点生命期对网络生命期的影响.

近年来, 博弈理论作为一种有效的工具被越来越多地应用于无线网络. 伍春等^[14]运用序贯博弈提出对无线网络资源跨层分配的算法, 直接对路径、信道、功率三层资源进行同时分配. 然而该算法最终无法收敛到纳什均衡(Nash Equilibrium, NE). 为使算法能够收敛到NE, 文献^[15]运用虚拟博弈提出联合信道分配与功率控制的JCAPC (joint algorithm of channel allocation and power control) 算法, 实现了降低干扰与节约能耗的联合优化. 然而该算法要博弈30轮后才能收敛到NE, 算法本身耗能较大, 因此要提高算法的收敛速度.

结合上述文献的优缺点, 本文首先根据网络拓扑信息和路由信息设计节点的负载模型, 从而构建了各节点的生命期模型. 为了降低网络干扰, 延长节点生命期, 将路径增益、交叉干扰以及节点生命期等特性参数融入效益函数, 构建信道分配博弈模型(channel allocation based-game, CABG). 最后基于CABG, 设计了一种优化网络生命期的抗干扰信道分配博弈算法(channel allocation game

algorithm for anti-interference and lifetime optimization, CAGLO). 仿真结果与GBCA算法进行比较, 证实交叉干扰与节点生命期的引入使网络的干扰和网络生命期得到有效改善.

2 生命期模型

节点的生命期通常由节点的剩余能量及其单位能耗所决定, 并且由能耗的一阶射频模型可知节点的能耗与其负载量相关^[16,17]. 因此, 我们首先构建节点的负载模型, 从而得到各节点生命期, 进而达到优化网络生命期的目的.

2.1 节点负载模型

WSN中节点的负载量 $L_{TX}(i)$ 通常定义为单位时间内节点*i*需要发送的本节点数据流量*L*与转发其他节点数据流量之和. 因此, 对于树形路由结构, 可以得到任意节点*i*的负载量为

$$L_{TX}(i) = L + k_i^{in} \times L, \quad (1)$$

其中 $k_i^{in} \times L$ 为节点*i*转发的其他节点数据流量, k_i^{in} 为节点*i*的子节点数.

由图1两种拓扑结构可以看出A节点接收的数据量来自于节点B, D, 所以可得 $L_{TX}(A) = L + 2 \times L$, 即图1(a)与图1(b)中A的接收数据量相同. 然而实际上节点B, D发送给A的数据量是不同的. 在图1(a)中, 节点D发送给A的数据量只有其自身监测的数据*L*, 而图1(b)中D不仅含有自身监测的数据*L*, 还有其子节点E—G发送给它的数据量.

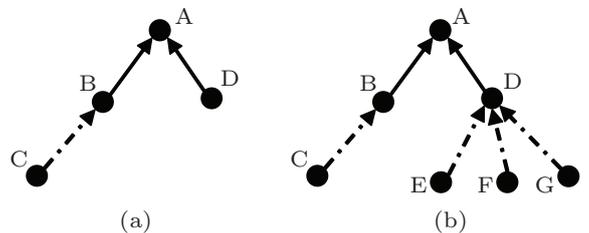


图1 不同拓扑时节点的负载 (a) 拓扑1; (b) 拓扑2
Fig. 1. Different loads with different topologies: (a) topology 1; (b) topology 2.

由此可见, 仅考虑节点A的子节点情况无法准确描述其负载量, 因此, 我们用节点两跳范围内的子节点情况来准确描述其负载情况, 可得 $\forall i$ 的负

载量为

$$L_{TX}(i) = L + L_{RX}(i), \quad (2)$$

其中 $L_{RX}(i)$ 为节点 i 接收的数据量, 由图 1(b) 可推导出节点 i 的 $L_{RX}(i)$ 如下:

$$\begin{aligned} L_{RX}(i) &= \sum_{j=1}^{k_i^{in}} L_{TX}(IN_i(j)) \\ &= \sum_{j=1}^{k_i^{in}} [L + L_{RX}(IN_i(j))], \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $IN_i(j)$ 为节点 i 的第 j 个子节点. 同理可得

$$L_{RX}(IN_i(j)) = \sum_{m=1}^{k_j^{in}} [L + L_{RX}(IN_j(m))]. \quad (4)$$

此时, 在 i 的两跳邻居范围内, 其子节点 $IN_i(j)$ 的子节点 $IN_j(m)$ 没有数据的接收, 因此 $L_{RX}(IN_j(m)) = 0$, 可得节点 i 的负载量为

$$\begin{aligned} L_{TX}(i) &= L + \sum_{j=1}^{k_i^{in}} [L + L_{RX}(IN_i(j))] \\ &= \left[1 + \sum_{j=1}^{k_i^{in}} \left(1 + \sum_{m=1}^{k_j^{in}} (1) \right) \right] \times L. \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 节点生命期模型

结合 2.1 节所构建的节点负载模型, 由能耗的一阶射频模型, 我们可得任意节点 i 进行一次收发能耗 $E_{cost}(i)$ 为

$$\begin{aligned} E_{cost}(i) &= (E_{elec} + \varepsilon_{amp}r^2) L_{TX}(i) \\ &\quad + E_{elec} \times L_{RX}(i) \\ &= (E_{elec} + \varepsilon_{amp}r^2) \\ &\quad \times \left[1 + \sum_{j=1}^{k_i^{in}} \left(1 + \sum_{m=1}^{k_j^{in}} (1) \right) \right] \times L \\ &\quad + E_{elec} \times \sum_{j=1}^{k_i^{in}} \left(1 + \sum_{m=1}^{k_j^{in}} (1) \right) \times L \\ &= a \times \left[1 + \sum_{j=1}^{k_i^{in}} \left(1 + \sum_{m=1}^{k_j^{in}} (1) \right) \right] \\ &\quad - b. \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式中, $a = (2E_{elec} + \varepsilon_{amp}r^2) \times L$, $b = E_{elec} \times L$, E_{elec} 为发射/接收电路损耗, ε_{amp} 为放大电路损耗,

r 为节点的通信半径. 对于给定的网络结构, a, b 都

是常数; $E_{cost}(i)$ 与 $\left[1 + \sum_{j=1}^{k_i^{in}} \left(1 + \sum_{m=1}^{k_j^{in}} (1) \right) \right]$ 成

正比; 节点两跳邻居范围内的子节点情况决定了其在网络中的能量消耗. 因此可知网络的拓扑结构和路由决定了各节点的能耗. 而节点的生命期取决于节点的剩余能量 E_i 和单位能耗 $E_{cost}(i)$, 因此节点 i 的生命期 $Life(i)$ 可表示为

$$\begin{aligned} Life(i) &= \frac{E_i}{E_{cost}(i)} \\ &= \frac{E_i}{a \times \left[1 + \sum_{j=1}^{k_i^{in}} \left(1 + \sum_{m=1}^{k_j^{in}} (1) \right) \right] - b}. \end{aligned} \quad (7)$$

由 (7) 式可以看出, 节点的生命期取决于节点的剩余能量和节点的两跳邻居范围内子节点数. 节点的剩余能量越大, 子节点数越少, 节点生命期就越长; 节点的剩余能量越小, 子节点数越大, 节点的生命期就越短.

3 信道分配博弈模型的建立

由于节点的自私性, 每个节点均希望选择使自己遭受干扰最小的信道, 而节点所选择的信道又影响着其他节点所受干扰的大小. 这种相互独立又彼此影响的特性与博弈论中的策略选择极为相似, 因此本文运用博弈论来构建信道分配模型.

3.1 抗干扰信道分配博弈模型

构建抗干扰信道分配博弈模型 CABG 的关键在于效益函数的设计. 由于交叉干扰无法避免, 并加剧了节点的重传能耗, 对于生命期较小的节点来说, 其将因能量耗尽而过早失效, 最终影响网络的正常运行. 因此, 综合考虑节点间相互干扰的作用, 使生命期较小且交叉干扰较大的节点选择干扰较小的信道, 达到减小网络干扰和延长网络生命期的目的. 效益函数的计算可分为干扰代价、交叉干扰代价和生命期代价三部分, 具体描述如下.

1) 干扰代价: 表示任意非叶节点 i 在其干扰链路上的干扰. 为了降低节点干扰, 各节点应该选择干扰最小的信道, 同时也要考虑该节点的加入对其他同信道节点造成的干扰. 因此, 我们将节点受到

的干扰以及对其他节点造成的干扰作为干扰代价 $IF(i)$, 定义为

$$IF(i) = \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(j)} \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(i, k)^2} + \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(i)} \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(k, j)^2}, \quad (8)$$

其中等式右边第一项为自己遭受的干扰, 第二项为自己所造成的干扰. 式中 R_i 为节点 i 干扰范围内的节点集合, $child(i)$ 为 i 的子节点集合, $p(i)$ 为 i 的父亲节点, $d(i, k)$ 表示节点 i 与 k 之间的距离. $rc(i)$ 为节点 i 所使用的信道, 当节点 j 与节点 i 使用相同信道时, 节点 j 将对 i 产生干扰; 反之, 则节点 j 将不对 i 产生干扰, 如干扰判断因子

$$\varepsilon(rc(i), rc(j)) = \begin{cases} 1, & rc(i) = rc(j) \\ 0, & rc(i) \neq rc(j) \end{cases}$$

所示. (8) 式表明, 使用相同信道的节点 j 越多, 且 i 距离 j 越近, 则 i 的干扰代价越大; 反之, 干扰代价越小.

2) 交叉干扰代价: 表示任意非叶节点 i 的交叉干扰对干扰链路上干扰代价的影响. 任意节点 i 的交叉干扰代价 $IS(i)$ 定义为

$$IS(i) = \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(j)} I_{IS}(i) \times \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(i, k)^2} + \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(i)} I_{IS}(j) \times \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(k, j)^2}, \quad (9)$$

式中 $I_{IS}(i)$ 为节点 i 的交叉干扰, 定义为: $I_{IS}(i) = cn(i)$, $cn(i)$ 表示非叶节点 i 的子节点数. (9) 式表明, 当节点 i 的干扰代价相同时, 由于交叉干扰无法避免, 其将增大节点的整体干扰, 同时增加节点的重传能耗, 加速节点失效. 因此当节点 i 的交叉干扰越大, 其交叉干扰代价 $IS(i)$ 越大. 所以, 在进行信道分配时, 交叉干扰代价大的节点应分配干扰较小的信道, 从而减小由交叉干扰引起的重传能耗.

3) 生命期代价: 表示节点的干扰基于不同生命期时对网络的危害. WSN 中任意节点 i 的生命

期代价 $LifeCost(i)$ 可以表示为

$$LifeCost(i) = \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(j)} \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(i, k)^2} \frac{1}{Life(i)} + \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(i)} \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(k, j)^2} \frac{1}{Life(j)}. \quad (10)$$

(10) 式表明节点 i 的生命期越小, i 的生命期代价越大. 这是由于对于生命期较小的节点, 较大的干扰加速了其能量耗尽进而失效. 因此 i 的生命期代价越大, 干扰的危害越大.

综上所述, 可得节点 i 在当前信道 $rc(i)$ 下的效益函数为

$$u_i(rc(i)) = - \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(j)} I_{IS}(i) \times \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(i, k)^2} \times \frac{1}{Life(i)} - \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin child(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in child(i)} I_{IS}(j) \times \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(k, j)^2} \times \frac{1}{Life(j)}. \quad (11)$$

由效益函数可知, 节点的干扰越大, 节点的效益值越小. 因此, 当最大化节点的效益时, 不仅降低了节点自身所遭受的干扰, 同时也降低了对其他节点所造成的干扰. 节点的交叉干扰及节点生命期的引入使节点在分配信道时避免了与网络中交叉干扰大且生命期较小的节点使用相同信道, 从而有效地延长了网络生命期.

策略博弈可以表示为 $G = \{I, S, u\}$, 其中, I 为参与者集合, S 为策略空间, u 为效益函数. 因此, 基于上述对抗干扰信道分配问题的分析, 构建 CABG 博弈模型如下.

1) 参与者 I : 为无线传感器网络中的所有非叶节点, 记 $I = (1, 2, \dots, n)$, 其中 n 为所有非叶节点的个数.

2) 策略空间 S : 为无线传感器网络中各节点的所有可用信道, 各节点的策略空间均相同, 记 $S_1 = S_2 = \dots = S_n = (1, 2, \dots, c)$, 其中 c 为所有

可用信道的个数.

3) 效益函数 \mathbf{u} : 为无线传感器网络中所有非叶节点在选择好信道时的整体效益函数, 记 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, 其中 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为非叶节点 i 的效益函数:

$$\begin{aligned} u_i(rc(i)) &= - \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in \text{child}(j)} I_{IS}(i) \\ &\times \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(i, k)^2} \times \frac{1}{\text{Life}(i)} \\ &- \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in \text{child}(i)} I_{IS}(j) \\ &\times \frac{\varepsilon(rc(i), rc(j))}{d(k, j)^2} \times \frac{1}{\text{Life}(j)}. \end{aligned}$$

3.2 CABG 模型分析

对于博弈论而言, NE 状态对于各参与者来说都是最优的, 所有参与者都没有积极主动偏离 NE 状态的意愿. 本小节结合博弈论相关理论, 证明 CABG 博弈模型存在 NE.

定义 1 (纳什均衡, NE)^[8] 一个策略组合 $\mathbf{s}^* = \{s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*\}$ 是博弈 $\mathbf{G} = \{\mathbf{I}, \mathbf{S}, \mathbf{u}\}$ 的一个 NE, 如果对于任意参与者 $i \in \mathbf{I}$ 和任意策略 $s_i \in \mathbf{S}_i$, 满足下列不等式:

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*). \quad (12)$$

定义 2 (顺势博弈与顺势函数)^[18] 对策略型博弈 $\mathbf{G} = \{\mathbf{I}, \mathbf{S}, \mathbf{u}\}$ 而言, 如果存在函数 $V: \mathbf{S} \rightarrow R$, 对 $\forall i \in \mathbf{I}, \forall p_{-i} \in \mathbf{S}_{-i}$ 以及 $\forall p_i, q_i \in \mathbf{S}_i$ 满足

$$\begin{aligned} V(p_i, p_{-i}) - V(q_i, p_{-i}) &> 0 \\ \Leftrightarrow u_i(p_i, p_{-i}) - u_i(q_i, p_{-i}) &> 0, \end{aligned} \quad (13)$$

那么 \mathbf{G} 就是一个顺势博弈, 函数 V 称为 \mathbf{G} 的顺势函数.

定理 1^[18] 如果策略型博弈 $\mathbf{G} = \{\mathbf{I}, \mathbf{S}, \mathbf{u}\}$ 是顺势博弈且 V 是其顺势函数, 那么使得 V 最大化的策略组合 \mathbf{s}^* 就是博弈 $\mathbf{G} = \{\mathbf{I}, \mathbf{S}, \mathbf{u}\}$ 的一个 NE.

定理 2 CABG 博弈模型存在顺势函数如 (14) 式所示, 且该模型是顺势博弈.

$$V(rc(i), rc(-i)) = \sum_{i=1}^n u_i(rc(i)). \quad (14)$$

证明 对于博弈模型, 要证明其是否为顺势博弈通常先证明该博弈是否存在函数

$V(rc(i), rc(-i))$ 满足 (13) 式所示的关系. 而对于该函数的构建, 通常与所有参与者的效益和相关, 因此我们构造该函数如 (14) 式所示为所有参与者的效益函数之和. 下面先证明该函数是否为顺势函数.

根据 (11) 式所定义的效益函数可知, 当节点 i 的信道由 s_{i2} 改变为 s_{i1} 时, i 的效益改变量为

$$\begin{aligned} \Delta u_i &= u_i(s_{i1}) - u_i(s_{i2}) \\ &= - \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in \text{child}(j)} \frac{I_{IS}(i) \times \frac{\varepsilon(s_{i1}, rc(j))}{d(i, k)^2}}{\text{Life}(i)} \\ &- \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in \text{child}(i)} \frac{I_{IS}(j) \times \frac{\varepsilon(s_{i1}, rc(j))}{d(k, j)^2}}{\text{Life}(j)} \\ &+ \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in \text{child}(j)} \frac{I_{IS}(i) \times \frac{\varepsilon(s_{i2}, rc(j))}{d(i, k)^2}}{\text{Life}(i)} \\ &+ \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} \sum_{k \in \text{child}(i)} \frac{I_{IS}(j) \times \frac{\varepsilon(s_{i2}, rc(j))}{d(k, j)^2}}{\text{Life}(j)}. \end{aligned} \quad (15)$$

(14) 式所示函数的改变量为

$$\Delta V = V(s_{i1}, rc(-i)) - V(s_{i2}, rc(-i)). \quad (16)$$

我们可以将 ΔV 分成两部分: 第一, 对于任意的节点 $j (j \neq i, j \notin \text{child}(i), j \neq p(i) \text{ 且 } i \in R_j)$ 的效益改变量; 第二, 节点 i 的效益改变量. 因此, 可以得到下式:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sum_{i=1}^n [u_i(s_{i1}, rc(-i)) - u_i(s_{i2}, rc(-i))] \\ &= \sum_{\substack{j \neq i \cap i \in R_j \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} [u_j(rc(j)^{s_{i1}}, rc(-j)) \\ &- u_j(rc(j)^{s_{i2}}, rc(-j))] \\ &+ [u_i(s_{i1}, rc(-i)) - u_i(s_{i2}, rc(-i))] \\ &= \Delta U_j + \Delta u_i, \end{aligned} \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= \sum_{\substack{j \neq i \cap i \in R_j \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} [u_j(rc(j)^{s_{i1}}, rc(-j)) \\ &- u_j(rc(j)^{s_{i2}}, rc(-j))]; \end{aligned}$$

$rc(j)^{s_{i1}}$ 表示此时节点 j 的信道为 $rc(j)$, 而节点 i 的信道为 s_{i1} . 结合 (11) 式, 由于每个节点的发射功率相同, 因此其干扰范围相同, 可得 ΔU_j 为

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap j \neq p(i)}} [u_j(rc(j)^{s_{i1}}, rc(-j)) \\ &\quad - u_j(rc(j)^{s_{i2}}, rc(-j))] \\ &= - \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap \\ j \neq p(i)}} \sum_{z \in \text{child}(i)} \frac{I_{IS}(j) \times \frac{\varepsilon(rc(j)^{s_{i1}}, s_{i1})}{d(j, z)^2}}{Life(j)} \\ &\quad - \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap \\ j \neq p(i)}} \sum_{z \in \text{child}(j)} \frac{I_{IS}(i) \times \frac{\varepsilon(rc(j)^{s_{i1}}, s_{i1})}{d(i, z)^2}}{Life(i)} \\ &\quad + \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap \\ j \neq p(i)}} \sum_{z \in \text{child}(i)} \frac{I_{IS}(j) \times \frac{\varepsilon(rc(j)^{s_{i2}}, s_{i2})}{d(j, z)^2}}{Life(j)} \\ &\quad + \sum_{\substack{j \in R_i \cap \\ j \notin \text{child}(i) \cap \\ j \neq p(i)}} \sum_{z \in \text{child}(j)} \frac{I_{IS}(i) \times \frac{\varepsilon(rc(j)^{s_{i2}}, s_{i2})}{d(i, z)^2}}{Life(i)}. \end{aligned} \tag{18}$$

由于 $\varepsilon(s_{i1}, rc(j))$ 与 $\varepsilon(rc(j)^{s_{i1}}, s_{i1})$ 相等, $\varepsilon(s_{i2}, rc(j))$ 与 $\varepsilon(rc(j)^{s_{i2}}, s_{i2})$ 相等, 比较 (15) 式与 (18) 式可得

$$\Delta U_j = \Delta u_i, \tag{19}$$

代入 (17) 式可得

$$\Delta V = 2\Delta u_i. \tag{20}$$

由此根据定义 2 可知 $V(rc(i), rc(-i))$ 是一个顺势函数, 因此可得 CABG 博弈模型是一个顺势博弈.

定理 3 CABG 模型一定存在 NE.

证明 在定理 2 的证明过程中, 已经证得如 (14) 式所示的函数 $V(rc(i), rc(-i))$ 正是 CABG 模型的顺势函数. 而网络中任意节点 i 的策略为 $S_i = (1, 2, \dots, c)$, 是有界且有限的, 所以一定存在能够使顺势函数 $V(rc(i), rc(-i))$ 达到最大值的策略组合. 根据定理 1 可知最大化该博弈模型的顺势函数的策略组合就是该模型的 NE, 因此该最大化 $V(rc(i), rc(-i))$ 的组合即为 CABG 模型的 NE, 定理 3 得证.

4 信道分配博弈算法设计

本小节所设计的信道分配算法, 不仅要降低网络中的通信干扰, 还要达到有效延长网络生命期的效果. 因此在设计该算法时, 应有效地延长生命期较小的节点的生命期. 同时, 虽然定理 3 证明了 CABG 模型具有 NE, 却并不能保证基于该模型所设计的信道分配算法可以收敛到 NE. 因此, 为保证参与者最终能够收敛到 NE 状态, 我们采用最佳回应策略收敛机理, 在 CABG 模型的基础上, 设计算法 CAGLO, 使各参与者获得效益最大值, 减小干扰. 其中, 最佳回应策略的定义如下.

定义 3 (最佳回应策略(best response dynamics))^[19] 是指在第 k 轮博弈中, 一旦某个参与者 i 被允许更新它的策略, 那么它将根据上一轮所有其他参与者的策略来选择使自己效益最大的那个策略, 即

$$s_i^{k+1} = \arg \max_{s_i \in S_i} u_i(s_i, s_{-i}^k). \tag{21}$$

CAGLO 算法分为初始化和信道分配两个阶段. 该算法的实现需要传感器节点满足: 1) 各节点的发射功率相同; 2) 在信道分配阶段, 各节点的剩余能量保持不变.

4.1 初始化阶段

在信道分配算法的初始化阶段, 将各有效信息进行初始化, 初始化信息如表 1 所列. 随后, 各节点通过广播进行信息交换来确定各自以及其邻居节点的信息, 构建自己的信息列表. 此时各节点将自己的列表信息广播出去进行第二次通信, 则每个节点将知道其邻居节点的列表信息.

表 1 节点 i 的初始化信息

Table 1. Initialization information of node i .

| $id(i)$ | $rc(i)$ | $E(i)$ | $u(i)$ |
|---------|---------|--------|--------|
|---------|---------|--------|--------|

表 1 中, $id(i)$ 表示节点 i 的 id 号, 用来标识各节点; $rc(i)$ 表示节点 i 的接收信道, 初始化时根据所设定的可用信道数目来进行随机分配; $E(i)$ 表示节点 i 的初始剩余能量, 初始化时在 10—40 之间随机分配, 用于计算节点的寿命; $u(i)$ 表示节点 i 在接收信道 $rc(i)$ 下的效益值, 初始化为 $-\infty$.

4.2 信道分配阶段

为了提高工作效率, 首先将网络中的所有节点按生命期升序排列, 优先对生命期小的节点分配信道. 在该阶段, 运用如表 1 所列的信息, 依据 (11) 式计算每个节点在不同信道时的效益值, 基于最佳回应策略选择信道 $s_i^{k+1} = \arg \max_{s_i \in S_i} u_i(s_i, s_{-i}^k)$. 当所有节点都经过 1 次博弈、决定自己的最优信道后, 将进行如下所述的信道选择: 当有最优信道相同的

节点存在于彼此干扰范围内, 则只对其中寿命最小的节点进行信道变换, 其余不变. 否则, 将会增大干扰.

网络中的各个节点经过反复博弈, 最终确定最大化自身效益的接收信道. 当网络中任意节点 i 第 k 与 $k+1$ 轮的信道满足如 (22) 式所示的条件时, 即为收敛到 NE.

$$s(k, i) = s(k + 1, i). \tag{22}$$

CAGLO 算法的伪代码如图 2 所示.

```

for(each non-leaf node i)do
  compare Life(i) for each node i;
  order NL in ascending order according to Life(i);
end for
for(each iteration k = 1,2,...)do
  for(each node i of NL)do
    calculate u in each available channel according to (11)
    compute the channel to maximize the payoff of i:  $s_i^{k+1} = \arg \max_{s_i \in S_i} u_i(s_i, s_{-i}^k)$ 
  end for
  for(all the node i j of NL)do
    if( $s_i^{k+1} = s_j^{k+1}$ )and j in the interference range of i then
      keep the node z with lest Life(z) as  $s_z^{k+1}$ , other node i, j to  $s_j^{k+1} = s_j^k$ 
    end if
  end for
  if ( $s_i^{k+1} = s_i^k$ )do
    break;
  end if
end for
//the final allocation s must be an NE, and set  $c_i = s_i^{k+1}$ 
    
```

图 2 CAGLO 算法的伪代码

Fig. 2. Pseudo code of CAGLO algorithm.

4.3 CAGLO 算法分析

性质 1 CAGLO 算法能够收敛到 NE.

证明 由定理 2, 我们得出 CABG 模型为顺势博弈, 其对应的顺势函数为网络中所有节点的效益之和: $V(rc(i), rc(-i)) = \sum_{i=1}^n u_i(rc(i))$. 由定理 3 得出该模型一定存在 NE, 该 NE 即为使 V 达到最大值的策略组合. CAGLO 算法基于最佳回应策略使各节点最终选择的均是最大化其效益的信道, 所以这些效益之和必然也是最大值, 因此 CAGLO 算法能够收敛到 NE. 性质 1 得证.

性质 2 CAGLO 算法能够有效地延长网络生命期.

证明 首先, 本文将 WSN 中最先因能量耗尽而失效的传感器节点的生命期定义为网络生命期, 因此可得网络的生命期为: $NetworkLife = \min Life(i)$. 当网络中不存在干扰时, $NetworkLife_{理想} = \min Life(i)_{理想}$. 然

而由于通信干扰的作用, 使得每个节点的实际网络寿命均小于等于理想状态下所求的节点生命期, 记为: $Life(i)_{实际} \leq Life(i)_{理想}$. 而对于 CAGLO 算法来说, 交叉干扰以及生命期的考虑, 使节点在选择信道时将选择与交叉干扰大、生命期小的节点所使用的信道不相同的信道. 从而 CAGLO 算法使理想生命期小的节点在干扰作用下的实际生命期大于 GBCA 算法下的实际生命期, 即 $Life(i_{Life(i)小})_{实际}^{CAGLO} > Life(i_{Life(i)小})_{实际}^{GBCA}$. 因此可得 CAGLO 算法下的网络生命期大于 GBCA 算法下的网络生命期, 即

$$\begin{aligned}
 & NetworkLife_{CAGLO} \\
 &= \min Life(i_{Life(i)小})_{实际}^{CAGLO} \\
 &> \min Life(i_{Life(i)小})_{实际}^{GBCA} \\
 &= NetworkLife_{GBCA},
 \end{aligned}$$

有效地延长了网络生命期. 所以, 性质 2 得证. 同时, 后面的仿真结果 (如图 6 所示) 也验证了该性质.

性质3 CAGLO算法的信息复杂度为 $O(n)$.

证明 在CAGLO算法的初始化阶段, 每个节点将进行两次广播进行信息的交换. 此时, 网络中有 n 个节点, 则在此阶段节点进行信息交换的信息量为 $2n$. 在CAGLO算法的信道分配阶段, 每个节点依据策略 s 的历史记录来进行博弈, 因此在此阶段并没有信息的交换. 很显然, CAGLO算法整个过程交换的信息量为 $2n$. 由此可得CAGLO算法的信息复杂度为 $O(n)$.

5 CAGLO算法仿真实验

在这部分我们通过MATLAB仿真对CAGLO算法的性能进行评价, 并将GBCA算法作为CAGLO算法的对比算法. 整个仿真区域为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的一个方块, 通信半径 $r = 30\text{ m}$, 可用信道数为4—10, 节点数为50—110, 所有仿真结果均为20组独立重复仿真的平均结果.

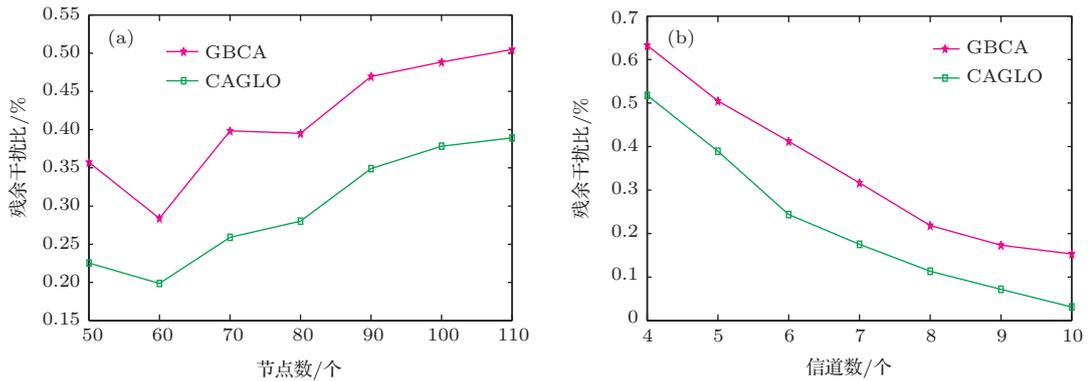


图3 节点数与可用信道数不同时的残余干扰对比 (a) 节点数不同时残余干扰比; (b) 信道数不同时残余干扰比
Fig. 3. Comparison of residual interference ratio with different node numbers and channel numbers: (a) residual interference ratios with different node numbers; (b) residual interference ratios with different channel numbers.

5.2 信道均衡性

对于信道分配的结果, 除了要达到良好的抗干扰效果, 还要均衡信道的使用, 避免信道资源的浪费. 本实验节点数为110, 可用信道数为5, 仿真结果如图4所示.

由图4(a)可见, 在存在81个非叶节点的环境下, 每个信道中的节点数均在16左右, CAGLO与GBCA算法的信道使用情况相对均衡. 并且由图4(b), 可得CAGLO算法的信道使用数方差小于

5.1 抗干扰性

本文所设计的信道分配算法是以消除干扰为设计目标的, 算法抗干扰性越强则残余干扰将越小. 因此, 我们用残余干扰比来衡量CAGLO算法的抗干扰性, 仿真结果如图3所示.

图3(a)中, 残余干扰比随着节点数目的增多而增大, 这是由于随着网络中节点数的增多, 造成使用相同信道的节点数增加, 加重了网络干扰. 图3(b)中, 残余干扰比随着可用信道数的增加而减小, 这是因为节点有了更多的信道选择, 从而消除了更多的干扰. 同时也表明合理地分配多信道, 能够有效地减少网络干扰. 由图3可见, 不论是节点数增多还是可用信道数增多, CAGLO的残余干扰比始终小于GBCA算法. 这表明CAGLO算法总比GBCA算法能消除更多的干扰, 其抗干扰性能优于GBCA.

GBCA算法, 因此, CAGLO算法中信道的使用节点数波动更小, 信道分配结果更均衡.

5.3 交叉干扰及节点生命期影响

在通信干扰的作用下, 交叉干扰大的节点重传能耗加剧, 生命期小的节点加速失效. 因此在信道分配过程中, 更应该减小交叉干扰大、生命期小的节点的干扰, 从而减小能耗, 延长网络生命期. 在本实验中, 将节点的生命期按升序排列并分成相应的生命期等级, 等级越高, 节点的生命期越大.

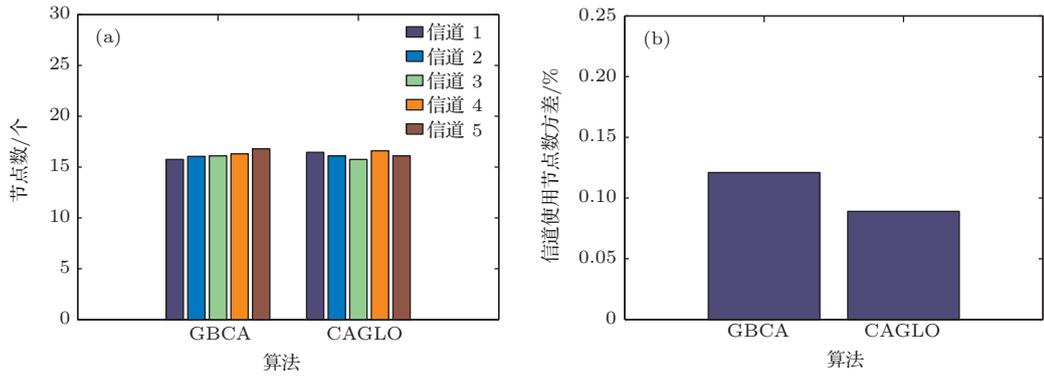


图4 (网刊彩色) 信道均衡性对比图 (a) 信道使用情况; (b) 信道使用情况方差

Fig. 4. (color online) Comparison of the balance of channel usage: (a) channel usage; (b) variance of channel usage.

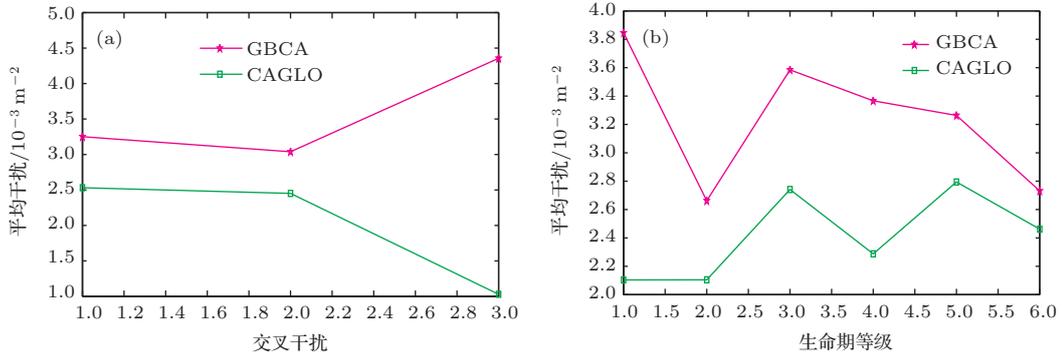


图5 交叉干扰及节点生命期对信道分配的影响对比 (a) 交叉干扰的影响效果; (b) 生命期的影响效果

Fig. 5. Comparison of the influence of intersecting interference and node lifetime: (a) influence of intersecting interference; (b) influence of node lifetime.

图5(a)中, CAGLO算法下的节点平均干扰随着交叉干扰值的增大而减小, 交叉干扰大的节点具有较小的干扰. 由图5(b)可见, 在生命期等级较小时, CAGLO算法下的节点平均干扰较小. 这是因为节点在信道分配过程中, CAGLO算法考虑了节点的交叉干扰和节点生命期, 倾向于为交叉干扰大的节点以及生命期较小的节点分配干扰较小的信道, 从而减小交叉干扰大、生命期小的节点的干扰, 均衡能耗. 而GBCA算法却存在交叉干扰越大生命期等级越小时干扰越大的现象, 造成节点能耗不均. 因此, CAGLO算法能够有效地均衡网络能耗.

5.4 网络生命期

在网络中, 严重的通信干扰将增大能耗, 从而使生命较小的节点过早失效, 降低网络生命期. 因此信道分配除了要达到消除干扰的目的, 还要延长网络生命期, 使网络的正常工作时间得到保证. 在本实验中, 与没有干扰的理想情况下计算出来的网络生命期相对比, 观察CAGLO与GBCA算法下实

际的网络生命期.

由图6可知, 在网络中, 没有通信干扰的理想状况下, 网络生命期为305.55, CAGLO算法下的生命期为233.49, 比GBCA算法下的124.41更接近理想状态. 由于CAGLO算法使节点在选择信道时将选择与交叉干扰大、生命期小的节点不同的信道, 从而使交叉干扰大、生命期小的节点在所分配到的信道上具有较小的干扰, 有效地延长网络生命期,

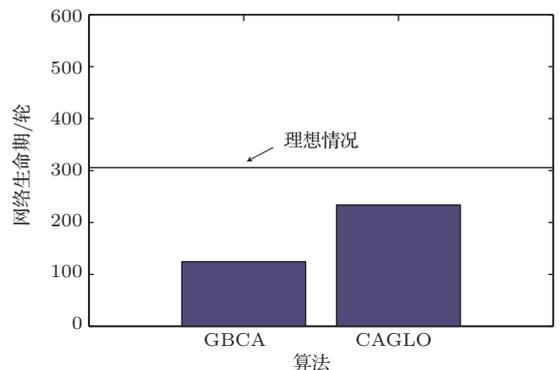


图6 网络生命期对比

Fig. 6. Comparison of network lifetime.

接近理想网络生命期. 图6验证了CAGLO算法能够有效地优化网络生命期.

5.5 收敛性

算法的收敛速度在一定程度上反映了该算法的复杂度. 收敛速度越快, 算法本身的能耗越小, 复杂度也相对越小. 本实验的仿真结果如图7所示, 其中图7(a)中的可用信道数为5, 图7(b)中节点数为110.

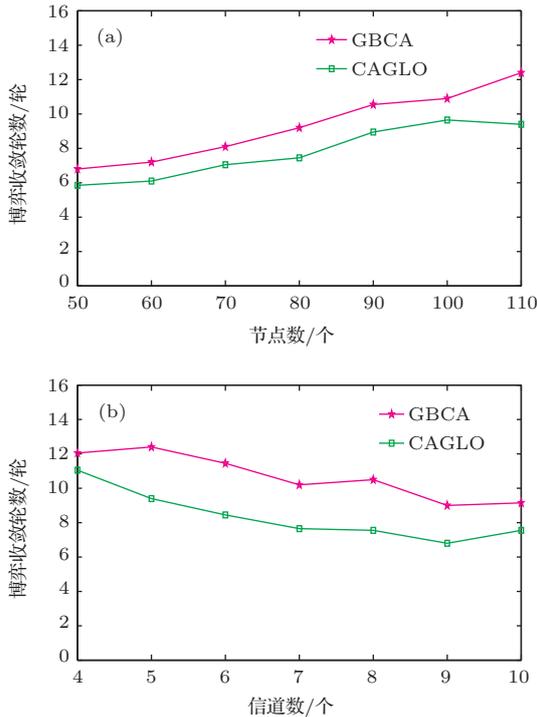


图7 节点数与可用信道数不同时的算法收敛速度对比 (a) 节点数不同时的收敛轮数; (b) 信道数不同时的收敛轮数

Fig. 7. Comparison of convergence speeds with different node numbers and channel numbers: (a) convergence rounds with different node numbers; (b) convergence rounds with different channel numbers.

在图7(a)中, 节点个数的增多导致信道改变的次数增多, 所以CAGLO与GBCA算法的收敛轮数呈上升趋势, 近似与节点个数成正比. 而在图7(b)中, 随着可用信道数的增加, CAGLO与GBCA算法的收敛轮数呈下降趋势. 这是因为越多的可用信道可以使节点很快地获得干扰最小的信道, 从而加速稳定. 由图7可见, 不论是随着节点数的增加还是可用信道数的增加, CAGLO算法的收敛轮数始终低于GBCA算法. 这表明CAGLO算法收敛性优于GBCA算法, 该算法具有较小的能耗和复杂度.

6 结论

为了减小节点间干扰, 保护能耗大、生命期短的节点, 本文首先根据网络拓扑信息和路由信息构建节点的负载模型, 从而计算出各节点的生命期; 其次, 考虑路径增益, 交叉干扰和节点生命期等参数构建了信道分配博弈模型CABG, 理论分析并证明了该模型是一个顺势博弈且具有NE解. 基于CABG模型, 本文设计了一种优化网络生命期的信道分配算法CAGLO, 该算法使得交叉干扰大且生命期较短的节点选择干扰较小的信道, 达到降低能耗、延长节点生命期的效果, 从而优化了网络生命期. 理论分析证明CAGLO算法最终可收敛到NE. 同时, 仿真结果表明, 该算法具有良好的抗干扰性和信道均衡性.

参考文献

- [1] Qian Z H, Wang Y J 2013 *J. Electron. Inform. Technol.* **35** 215 (in Chinese) [钱志鸿, 王义君 2013 电子与信息学报 **35** 215]
- [2] Tong X J, Zuo K, Wang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 030502 (in Chinese) [佟晓筠, 左科, 王翥 2012 物理学报 **61** 030502]
- [3] Zhou J P, Liu L W, Deng Y H, Huang S Q 2014 *Wireless Personal Commun.* **75** 273
- [4] Karaoglu B, Heintzelman W 2014 *IEEE Trans. Mobile Comput.* **15** 951
- [5] Amini R M, Dziong Z 2014 *IEEE Trans. Network and Service Management* **11** 188
- [6] Zhou G, Huang C D, Yan T, He T, Stankovic J A, Abdelzaher T F 2006 *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications* Barcelona, Spain, April 23–29, 2006 p1
- [7] Wu Y F, Stankovic J A, He T, Lin S 2008 *Proceedings of the 27th IEEE Communications Society Conference on Computer Communications* Phoenix, AZ, United States, April 13–18, 2008 p1867
- [8] Chen J M, Yu Q, Cheng P, Sun Y X, Fan Y F, Shen X M 2011 *IEEE Trans. Automat. Control* **56** 2332
- [9] Wang H, Roman H E, Yuan L Y, Huang Y F, Wang R L 2014 *Computer Networks* **75** 212
- [10] Chen B, Gong Q Q, Hou S, Li X D, Hao X C, Liu B 2014 *J. Computat. Inform. Syst.* **10** 4385
- [11] Liu C, Rong B, Cui S 2015 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **14** 138
- [12] Marina M K, Das S R, Subramanian A P 2010 *Comput. Networks* **54** 241
- [13] Hao X C, Gong Q Q, Hou S, Liu B 2014 *Wireless Personal Commun.* **78** 1047

- [14] Wu C, Jiang H, You X J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 088801 (in Chinese) [伍春, 江虹, 尤晓健 2014 物理学报 **63** 088801]
- [15] Hao X C, Zhang Y X, Jia N, Liu B 2013 *Wireless Personal Commun.* **73** 1169
- [16] Liu H R, Yin W X, Han T, Dong M R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040509 (in Chinese) [刘浩然, 尹文晓, 韩涛, 董明如 2014 物理学报 **63** 040509]
- [17] Liu Y H, Ren A, Sun D Y, Wang A M 2013 *Comput. Electr. Engineer.* **39** 1767
- [18] Beaudé O, Lasaulce S, Hennebel M 2012 *Proceedings of the 6th International Conference on Network Games, Control and Optimization* Avignon, France, November 28–30, 2012 p96
- [19] Fanelli A, Moscardelli L, Skopalik A 2012 *Proceedings of the 37th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science* Bratislava, Slovakia, August 27–31, 2012 p360

Channel allocation game algorithm based on lifetime model in wireless sensor network*

Hao Xiao-Chen[†] Yao Ning Ru Xiao-Yue Liu Wei-Jing Xin Min-Jie

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 13 January 2015; revised manuscript received 3 March 2015)

Abstract

In wireless sensor network, the larger interference makes the data transmission failed, thus leading to data retransmission of nodes. This situation exacerbates the energy consumption of retransmission. As a result, some nodes will prematurely fail to work, thus reducing the network lifetime. In order to deal with the above issue, this paper takes full advantage of the topology and route information to design a novel load model of nodes. Then, a lifetime model of each node is constructed based on the load model. Subsequently, the path gain, intersecting interference and node lifetime are integrated into a utility function to construct a channel allocation game model called channel allocation based-game (CABG) by taking advantage of the game theory. The theoretical analysis proves the existence of the Nash Equilibrium of CABG. And then, using the best response dynamics, a channel allocation game algorithm for anti-interference and lifetime optimization (CAGLO) is established based on CABG. This algorithm CAGLO makes nodes avoid selecting the same channel as the large intersecting interference nodes and shorter-lifetime nodes in the process of channel selection, thus realizing the channel selection with less interference, less and balanced energy consumption. The theoretical analysis and simulation results show that the algorithm CAGLO could converge to the Nash Equilibrium with a good convergence speed finally. And the algorithm CAGLO has less message complexity. As a result, the algorithm itself has less energy consumption of communication. At the same time, it has good characteristics of anti-interference, energy consumption equilibrium and channel equalization. The algorithm CAGLO proved in this paper prolongs the network lifetime effectively.

Keywords: wireless sensor network, channel allocation, lifetime model, game theory

PACS: 01.20.+x, 02.50.Le, 05.65.+b, 88.05.Jk

DOI: 10.7498/aps.64.140101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61403336) and the Independent Research Project Topics A Category for Young Teacher of Yanshan University of China (Grant No. 13LGA008).

[†] Corresponding author. E-mail: haoxiaochen@ysu.edu.cn