

一种新的传感器网络混合广播调度方法

张细政^{1,2}, 王耀南¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南工程学院 计算机与通信学院, 湖南 湘潭 411104)

摘要: 由于传感器网络所使用无线信道的共享性和相互干扰, 节点间数据广播会产生资源冲突, 广播调度要解决的即为每个节点分配到一个无冲突传输时隙, 其目标是找到最优时分复用(TDMA: time division multiple access)调度解, 使得帧长度最短而信道利用率最大. 提出基于神经网络的两阶段混合广播调度算法. 在阶段一, 使用改进的顶点着色算法来获得调度所需最短时隙数目; 在阶段二, 使用模糊Hopfield网络将节点模糊聚类为M类, 同类节点可以在同一时隙被调度, 不同类节点必须在不同时隙被调度. 用该算法对3个测试拓扑图进行调度, 实验结果表明该算法比其他算法能获得更短的帧长度和更低的网络延迟, 证明了所提算法的可行性和有效性.

关键词: 无线传感器网络; 广播调度问题; Hopfield神经网络; 图着色

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

A new hybrid broadcast scheduling scheme for wireless sensor network

ZHANG Xi-zheng^{1,2}, WANG Yao-nan¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. College of Computer and Communication, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411104, China)

Abstract: Because of the mutual interference and the sharing of wireless links in a wireless sensor network(WSN), conflicts occur when data messages are transmitting between nodes. The broadcast scheduling allocates for each node an independent time interval with a fixed length, and finds an optimal feasible solution of the shortest frame-slot length and the maximal transmission-rate. A two-stage hybrid algorithm is proposed based on the neural network to solve this problem for WSN. In the first stage, a modified sequential vertex coloring algorithm is used to obtain a minimal TDMA(time division multiple access) frame length. In the second stage, a fuzzy Hopfield network is adopted to maximize the channel utilization-ratio. Experimental results, obtained from the applications to three benchmark graphs, show that our algorithm can achieve better performance with shorter frame length and higher channel utilization-ratio than other exiting BSP solutions.

Key words: wireless sensor network; broadcast scheduling; Hopfield neural network; graph coloring

1 引言(Introduction)

在监测区域内, 以随机方式分布的集成有传感器、数据处理单元和无线通信模块的微小节点通过自组织方式便构成了无线传感器网络(WSN)^[1]. WSN中节点经常需要广播消息或数据, 用于同步机制、拓扑控制或路由建立与维护等. 由于无线链路的共享与开放性, 很容易造成消息传输时的相互冲突, 若节点的多个相邻节点同时向该节点广播消息, 则必然产生相互干扰或冲突并造成广播消息不能正确收发, 大多数WSN网络此时要求源节点重传, 从而造成节点能量额外消耗, 因此需要对节点的消息广播进行合理调度以延长网络寿命^[2]. 大多数WSN使用时分复用(TDMA)作为无线信道共享与

接入方式^[3], 本文研究TDMA下WSN网络广播调度问题(broadcast scheduling problem, BSP), 期望能实现在网络拓扑稳定下, 节点间消息无冲突传输, 并最大化信道利用率.

2 广播调度问题(Broadcast scheduling problem)

记WSN网络为无向简单图 $G = (V, E)$, 顶点 $V = \{v_i\}$ 代表网络中传感节点, 边 $E = \{e_{ij}\}$ 为节点间传输链路. 若传感节点 $i \in V, j \in V$, 且 i, j 在彼此的传感半径内, 则称 i, j 为一跳相邻节点, 即存在无线链路 $e_{ij} \in E$; 若 i, j 间不存在一跳相邻节点, 但存在中间节点 k 使得 $e_{ik} \in E$ 且 $e_{kj} \in E$, 则称节点 i, j 为二跳相邻节点. 传感节点间要能正确收发数

据, 必须满足以下约束条件^[3]: 1) 节点不能同时接收与发送数据, 即若 $e_{ij} \in E$, 则节点 i 与节点 j 必须分配以不同时隙来传输数据, 称作第1类约束; 2) 节点不能同时接收两个或多个相邻节点发送的数据, 即若 $e_{ij} \in E$ 且 $e_{kj} \in E$, 则节点 i, k 必须在不同时隙发送数据以避免在节点 j 处发生冲突, 称作第2类约束. 定义二进制矩阵 $S = \{s_{ij}\}$ 表示一个传输调度, ρ 为 WSN 的带宽利用率, 用 $S' = \{S^1, S^2, \dots\}$ 表示无干扰可行调度集, 则最优调度问题描述如下: 对于给定拓扑 WSN 网络, 寻找最优调度 $S^{\text{opt}} \in S'$, 在满足第1类和第2类约束条件下, 具有最短的帧长度 S^{opt} 和最大的信道带宽利用率 ρ^{opt} .

3 基于神经网络的两阶段调度方法(Hopfield neural network based on two-stage scheduling)

3.1 阶段一(Stage 1)

对给定拓扑的无向图, 阶段一目标是使帧时隙长度降为最短, 即用最少时隙数 M 完成调度. 图的顶点着色问题(VCP)求解是NP完全的, 目前的求解方法主要是启发式算法. 虽然顺序着色只能找到次优解, 但其复杂度最小, 计算量比其他最优和次优算法要低1~2个数量级. 考虑到传感节点的能量和计算能力有限, 这里结合最大饱和度与最大度数准则设计新的顶点着色算法.

算法包含如下3个处理环节: 1) 确定帧时隙长度上下界. 对于有 N 个结点 WSN 网络, 最优帧长度 M 范围为 $L_m \leq M \leq N$, 其中 $L_m = \max \deg i + 1$, $\deg i$ 为节点 i 的度数; 2) 执行初始化时隙分配. 令待初始化节点集合为 $G = \{n_i, i = 1, 2, \dots, L_m\}$, G 由图中具有最大度数的节点 n_1 及与 n_1 相距1跳节点的相邻节点 n_i 构成, 将时隙 i 分配给节点 n_i ; 3) 改进的顺序着色算法.

算法-Minimizing-frame-slots-length:

输入: 原始 WSN 拓扑 $G = (V, E)$.

输出: 节点时隙调度矩阵 $S = \{s_{ij}\}_{N \times M}$.

Step 1 网络节点拓扑排序. 对节点按照度数递减规律排序并存储为队列 $Q = \{n_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 得到网络节点的最大度数 ΔG ;

Step 2 确定时隙下确界. 置初始时隙数 $M = \Delta G + 1$, 调度矩阵 $S = \{0\}_{N \times M}$;

Step 3 节点时隙初始化调度. 不失一般性, 将第 i 个时隙分配到节点 n_i , 得已调度节点集 $G_c = \{n_i, i = 1, 2, \dots, M\}$, 令 $s_{ii} = 1$, 计数器 $p = M + 1$;

Step 4 对未调度节点排序. 按照最大饱和度准

则对剩下的 $N - L_m$ 个顶点排序, 存储为队列

$$Q' = \{n_j, j = L_m + 1, \dots, N\};$$

Step 5 调度 Q' 中节点 n_j . 搜索满足2跳内约束的时隙, 记不同时隙数为 N_c , 依据 N_c 值分别执行以下处理:

① 若 $N_c > 1$, 将第一个可用时隙指派给节点 n_j , $s_{ij} = 1$;

② 若 $N_c = 1$, 将该唯一时隙指派给节点 n_j , $s_{ij} = 1$;

③ 若 $N_c = 0$, 则此时无空闲时隙指派给节点 n_j , 转Step 7;

Step 6 判断是否所有节点已完成调度. 若 $p = N$, 算法停止; 否则令 $p = p + 1$, 转Step 5;

Step 7 新增一个时隙, 重新调度. 令 $M = M + 1$, 转Step 5.

算法Step 1排序的计算量为 $O(|N|)$, Step 4排序的计算量为 $O(|N - L_m|^3)$, N 为网络顶点数, L_m 是顶点最大度数加1. 整个算法的计算量约为 $O(|N|^3)$.

3.2 阶段二(Stage 2)

在阶段二, 使用模糊Hopfield神经网络对 WSN 网络节点进行模糊聚类^[4,5], 分类数为阶段一中求得的 M , 输入样本为待调度节点. 同一类中的所有节点可以在同一个时隙同时被调度; 不同类中的节点必须在不同时隙被调度. 考虑 $N \times M$ 结构Hopfield网络, 节点 i 是否在第 j 个时隙传输数据由Hopfield网络处在 (i, j) 位置神经元的输出 p_{ij} 确定. 利用第2节中的约束条件来设计优化目标, 即Hopfield网络能量函数 E . 首先, 所有的数据包应该在一个时隙内同步传送; 其次, 当节点 i 在时隙 j 传输数据时, 其他所有节点 i 的相邻节点不能分配在时隙 j ; 最后, 当节点 i 传输数据时, i 的二跳相邻节点也不能被分配到时隙 j 去传输数据. 能量函数 E 大小反映网络当前时隙调度与最优调度间差距, 在考虑所有以上约束条件后, 本文所设计能量函数 E 如下:

$$E = w_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (p_{ij} - 1)^2 + w_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{y=1}^N d_{jy} p_{yi} + w_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{y=1}^N d_{jy} \sum_{k=1}^N d_{yk} p_{ij}^2 (n_i - v_i)^2. \quad (1)$$

其中: n_i 表示第 i 个节点, d_{ij} 为节点 i, j 间欧氏距离, 权值 w_1 和 w_2 为正且满足 $w_1 + w_2 = 1$, 权系数取值会影响网络收敛性, 需合理选取. v_i 为第 i 类欧

氏中心, 即 $v_i = \sum_{y=1}^N \frac{n_y p_{ki}^2}{\sum_{k=1}^N p_{ki}^2}$. (i, j) 位置神经元输入

为 $I_{ij} = (n_i - v_i)^2 + \Delta I_{ij}$, 神经元输出为 p_{ij} , 外部激励项 ΔI_{ij} 取常数. Hopfield 网络优化流程如下:

Step 1 初始化网络内神经元 (i, j) 输出 p_{ij} :

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^M \left(\frac{\|n_i - v_j\|}{\|n_i - v_k\|} \right)^2;$$

Step 2 更新模糊隶属度函数 $p_{ij} = \sum_{k=1}^M \frac{I_{ik}}{I_{ij}}$, 重新计算类中心 v_i ;

Step 3 由式(1)计算能量函数;

Step 4 判断网络是否收敛于稳定状态, 若 $|E(n+1) - E(n)| > \varepsilon$ (ε 为阈值), 转 Step 2; 否则, 网络收敛, 算法终止.

4 实验结果与分析(Simulation results and discussion)

对 TS-HNN 算法的调度性能进行分析, 与平均退火策略(MFA)^[2]、基于遗传算法的 Hopfield 神经网络(HNN-GA)^[4] 和含噪混沌神经网络(NC-NN)^[5] 3 种方法调度性能比较. 使用 3 种不同拓扑的测试网络 Case 1~3^[6]. 实验中使用的数据包为固定长度, 时隙长度设置为每包所需传输时间; 节点间以泊松分布随机收发数据包. 每种拓扑结构运行 50 次, 取平均值进行比较. 表 1 给出本文算法(TS-HNN)与其他 3 种方法求解得到的网络最小延迟 η 和帧长度 M . 在节点数较少(Case 1)或平均度数不高时(Case 3), 4 种算法都能找到最优帧长 $M = 8$; 对于节点数较多具有复杂结构网络(Case 2), TS-HNN 也能找到次优帧长; 且 TS-HNN 在 3 种拓扑下都具有最低的网络时延. 测试拓扑 Case 1 调度结果如图 1 所示, 填充有黑色的方格代表所在节点(node)在该时隙(slot)可被调度. 图 2 详细描述了网络时延随数据包(packet)服务速率变化的情况. 随着服务速率增加, 网络时延也在变长, 在节点数较少时(Case 1), 4 种算法的时延相差不大, 如图 2(a); 当节点数增加时(Case 2), 4 种算法下的网络时延差异明显增大, 如图 2(b).

表 1 TS-HNN 与其他算法调度结果比较

Table 1 Comparison between TS-HNN and others

Case	TS-HNN		NC-NN		HNN-GA		MFA	
	η	M	η	M	η	M	η	M
1	6.7	8	6.8	8	7.0	8	7.2	8
2	8.8	11	9.2	10	9.3	10	10.5	12
3	5.1	8	5.8	8	6.3	8	6.9	9

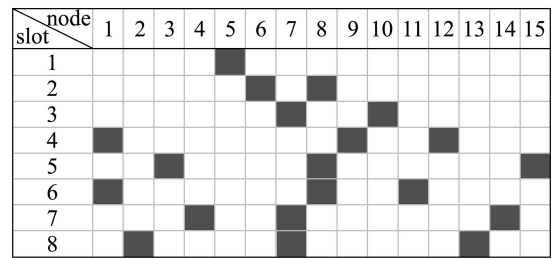
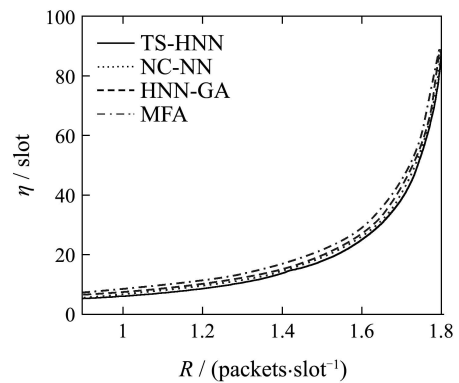
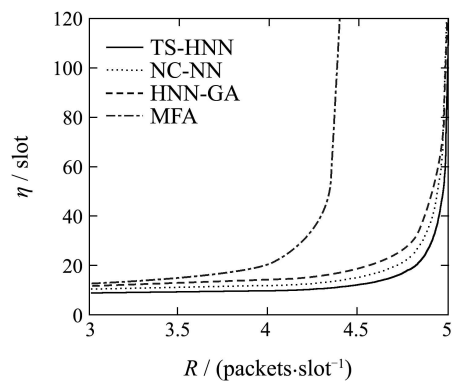


图 1 Case 1 拓扑的调度结果

Fig. 1 Scheduling results for Case 1



(a) Case 1



(b) Case 2

图 2 Case 1 和 Case 2 拓扑下 4 种算法的网络时延
Fig. 2 The network time delay for Case 1 and Case 2

5 结束语(Conclusion)

调度是一类经典的带约束资源优化分配问题, 本文以传感器网络为研究背景, 提出了一种基于图着色与神经网络的两阶段广播调度算法. 算法的基本思想是将广播调度问题求解转化为两阶段目标寻优: 第 1 阶段借助顶点着色思想搜索给定拓扑 WSN 的具有最短时隙数目的帧结构; 第 2 阶段在上述帧结构下使用模糊 Hopfield 网络为每个节点增添额外的无冲突传输时隙, 从而使得在原有帧长度下尽可能多的让更多节点实现并行无干扰传输, 以最大化信道利用率, 仿真实验证明了所提方法的有效性.

(下转第 348 页)

参考文献(References):

- [1] YAO X, LIU Y, LIN G M. Evolutionary programming made faster[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(2): 82 – 102.
- [2] 李宏, 焦永昌, 张莉, 等. 一种求解全局优化问题的新混合遗传算法[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 343 – 348.
(LI Hong, JIAO Yongchang, ZHANG Li, et al. Novel hybrid genetic algorithm for global optimization problems[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 343 – 348.)
- [3] XU W B, SUN J. Adaptive parameter selection of quantum-behaved particle swarm optimization on global level[C] // *Proceedings of International Conference on Intelligent Computing*. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 420 – 428.
- [4] GIMMLER J, STÜTZLE T, EXNER T E. Hybrid particle swarm optimization: an Examination of the influence of iterative improvement algorithms on performance[C] // *Proceedings of the Fifth Inter-*

national Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 436 – 443.

- [5] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
(ZHOU Ming, SUN Shudong. *Genetic Algorithms: Theory and Applications*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.)

作者简介:

赵文红 (1981—), 女, 硕士, 主要从事全局数值优化算法的研究, E-mail: wwzwh@sohu.com;

王巍 (1980—), 男, 博士, 主要从事可信计算等研究, E-mail: wwlofty@gmail.com.

王宇平 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事优化理论与应用、进化算法等研究, E-mail: ywang@xidian.edu.cn.

(上接第344页)

参考文献(References):

- [1] PENG Y, SOONG B H, WANG L. Broadcast scheduling in packet radio networks using mixed tabu-greedy algorithm[J]. *Electronics letters*, 2004, 40(6): 375 – 376.
- [2] WANG G, ARISARI N. Optimal broadcast scheduling in packet radio networks using mean field annealing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(2): 250 – 260.
- [3] YEO J, LEE H. An efficient broadcast scheduling algorithm for tdma ad-hoc networks[J]. *Computer Operations Research*, 2002, 29(13): 1793 – 1806.
- [4] SALCEDO SANZ S, BOUSONO CALZO C. A mixed neural-genetic algorithm for the broadcast scheduling problem[J]. *Automatica*, 1995, 31(9): 1341 – 1344.

- [5] SHI H, WANG L. Broadcast scheduling in wireless multihop networks using a neural-network-based hybrid algorithm[J]. *Neural Networks*, 2005, 18(5/6): 765 – 771.

- [6] SHEN Y J, WANG M S. Broadcasting scheduling in wireless sensor networks using fuzzy Hopfield neural network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(2): 900 – 907.

作者简介:

张细政 (1978—), 男, 讲师, 博士研究生, 目前研究方向为智能信息处理及非线性控制, E-mail: z_x_z2000@163.com;

王耀南 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制及智能信息处理, E-mail: yaonan@hnu.cn.