

稳定高效节能且邻近相关的网络拓扑协议

胡学海, 王厚军, 任代蓉

(电子科技大学自动化学院 成都 610054)

【摘要】 现有的无线传感器网络拓扑协议未全面考虑节点位置、休眠、剩余能量的影响, 且依赖于GPS等基础设施获得节点绝对位置, 导致网络成本高, 能量有效性不足。该文在DEAC协议的基础上, 提出了一种分布、稳定、高效节能和利用邻近相关信息数据融合及节点休眠策略的无线传感器网络拓扑控制协议(SEENRT)。该协议利用剩余能量信息, 平均各节点能耗负担; 利用邻近相关信息和节点休眠, 降低覆盖冗余, 减少网络能耗。试验结果表明SEENRT协议和LEACH、HEED和DEAC协议相比, 能有效地降低网络能耗、平均节点的负担及延长网络的生存时间。

关键词 数据融合; 能量消耗; 生存时间; 拓扑优化; 无线传感器网络

中图分类号 TP274; TP212.6

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.019

Steady Energy-Efficient and Neighborhood-Relative Topology Protocol

HU Xue-hai, WANG Hou-jun, and REN Dai-rong

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chendu 610054)

Abstract Based on distributed energy-efficient adaptive clustering (DEAC), this paper presents a new WSN node-location-irrespective topology protocol, named SEENRT. In this protocol, node location, sleep, residual energy, and cost of WSN are sufficiently considered. This protocol uses the residual energy information to average the burden of the node energy consumption and uses neighborhood-relative information and node sleep to reduce coverage redundancy and WSN energy consumption. The result of test shows that SEENRT protocol is more effective in energy efficiency.

Key words data fusion; energy consumption; lifetime; topology optimization; wireless sensor network

无线传感器网络(WSN)是由一组无线传感器节点按一定通信协议和拓扑结构组成的测量网络, 在军事、环境监测、故障诊断、医疗测量等领域具有广泛的应用前景。由于节点数量巨大、分布密集, 且单个节点的功率有限, 无法补充能量, 因此设计有效的拓扑控制协议, 合理高效地使用网络能量, 延长网络生存时间, 成为WSN设计的关键。

目前流行的拓扑控制协议都是在层次协议(主要有LEACH、LEACH-C、HEED协议, GAF协议和改进GAF算法等)的基础上, 或从平均节点负担的角度来提高网络能量使用的有效性^[1-3]; 或从优化节点分布, 减少网络覆盖冗余的角度来降低网络能耗^[4-5], 但这些协议大多只考虑了问题的一个方面, 性能不够优化; 且节点不考虑休眠、位置信息依赖外部基础设施或定位机制获得, 成本高、能耗大。因此, 本文在文献[6]的基础上, 增加了节点休眠策

略, 优化了协议参数的确定方法, 提出了一种分布、稳定、高效, 利用邻近相关信息及节点休眠策略的无线传感器网络拓扑协议——SEENRT协议。

1 相关工作

拓扑控制协议主要可以划分为平面协议和层次协议, 主要评价指标有能量有效性、生存时间、可扩展性、自适应性。由于平面协议冗余多, 各节点间通信干扰大, 通信量负担差异巨大。其网络能量有效性、实时性、可扩展性一般低于层次协议。

LEACH协议是一种基于聚类的低功耗自适应路由协议。它通过定期随机选择类首, 平均分担中继通信业务, 从而平均各节点能耗, 延长网络生存时间。实验证明, 它比一般的平面多跳路由协议和静态聚类算法网络生存时间长15%。但该算法不考虑剩余能量和类首位置, 性能不够优化。LEACH-C、

HEED和GAF协议都是从LEACH协议发展而来的, LEACH-C将离散式区域算法LEACH改变为中央控制, 提高了节点能耗的均匀性, 但增加了基站和节点的消息交换数量, 实际能耗比LEACH协议高40%左右^[2]。HEED协议利用了剩余能量, 但未考虑位置信息, 无法降低覆盖冗余, 网络的能量有效性提高不大。GAF算法和改进GAF算法将检测区域划分成虚拟单元格, 每个单元格定期选举一个簇头节点作为类首, 协议需要GPS、有向天线等定位设施定位, 大幅度提高了网络成本。且文献[7]的试验结果表明, 与定位设施交换信息、定位设施自身耗能将大幅度增加网络能耗。综合考虑以上问题, 文献[6]提出了DEAC协议, 利用邻居覆盖信息和剩余节点能量来优化类首选择, 但该协议未考虑节点休眠和邻居与节点间的距离信息的利用, 且参数 M_0 和冗余度门限的确定依赖经验, 造成算法性能优化不足。针对以上问题, 本文提出了SEENRT协议。

2 系统模型和问题陈述

本文讨论的网络模型如下:

- (1) 被检测区域足够大, 边界条件可以忽略。
- (2) 假设传感器节点均匀分布在A内, 节点密度足够大, 且存在一定冗余度。
- (3) 节点是同构的, 且初始能量相同。
- (4) 测量为定期测量, 任务平均, 且不重。
- (5) 节点采用布尔感知模型, 即感知范围以节点为圆心, 半径为 R 。
- (6) 网络各节点是时间同步的。
- (7) 节点无GPS、有向天线等定位设施。
- (8) 节点不可移动, 无法补充能量。

在上述网络模型下, 本文讨论在满足网络连通性和覆盖率的基础上调度节点状态, 选择主干网, 形成一个测量覆盖、数据转发的优化网络。减小系统能耗, 平均节点间负荷, 更合理高效地使用网络能量, 延长整个网络的生存时间, 是算法的主要设计目标。

3 SEENRT协议

3.1 SEENRT协议描述

SEENRT协议按轮来进行工作, 每一轮由节点竞选和节点监控两个阶段组成。在节点竞选阶段各节点根据剩余能量和相关信息确定工作节点和类首。在节点监控阶段, 为使能量最小化, 节点监控阶段应远长于竞选阶段, 且未入选工作节点和类首

的节点休眠, 以减少网络能耗。SEENRT协议算法步骤如下:

1) 节点竞选阶段。

(1) 系统广播备选工作节点选择门限 T_0 , 备选类首选择门限 T_1 , 门限计算公式有:

$$T_0 = \frac{M_0}{N_r} \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{M_1}{N_r} \quad (2)$$

式中 N_r 为第 r 轮剩余存活节点数; M_0 为每轮节点成为期望备选工作节点数; M_1 为每轮节点成为期望备选类首节点数。

(2) 令

$$Q_{i_r} = \text{rand}(1) \times \left(\frac{W_0}{W_{i_r}} \right)^m \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_{i_r}^m}{n W_0^m} \right) \quad (3)$$

式中 W_0 为节点的初始能量总能量; W_{i_r} 为第 r 轮节点 i 的剩余能量; $\text{rand}(1)$ 为随机函数, 取值(0,1)。

(3) 当 $Q_{i_r} < T_0$ 时, 节点成为备选工作节点。

(4) 根据避让(back-off)机制选取工作节点。每个备选工作节点随机设定一个避让时间 T_d , T_d 均匀分布在 $[0, T_f]$ 内, 如果到达避让时间后, 根据收到的邻居相关信息计算出的冗余度 u 小于1, 则按覆盖半径 R_s 向邻居广播测量覆盖消息和本节点的邻居, 否则退出备选工作节点状态, 进入休眠。

(5) 在工作节点中, 再次按式(3)产生 Q_{i_r} 。

(6) 当 $Q_{i_r} < T_1$ 时, 节点成为备选类首。

(7) 再根据避让机制竞争类首。若到达避让时间后, 备选类首收到的冗余度 v 小于1, 则按覆盖半径 R_l 向邻居广播类首覆盖消息, 否则退出备选类首状态。

(8) 确定本轮类首后, 类首向工作节点广播自己成为类首的消息, 节点根据接收到消息的强度来决定加入哪个聚类, 并告知相应类首, 基于TDMA方式, 类首为类成员分配时隙。节点竞选阶段结束。

2) 节点监控阶段。

工作节点测量数据, 再通过类首组成的主干网, 将测量数据传送到基站, 其余节点休眠。

3) 工作一段时间后, 网络进入下一轮。

协议中邻居定义如下:

定义 1 对任意节点 j , 邻居节点集为:

$$N_{(i)} = \{n_{(i)} \in N \mid d_{(i,j)} \leq R_q, i \neq j\} \quad (4)$$

式中 $n_{(i)}$ 为邻居节点; $d_{(i,j)}$ 为节点 i 、 j 间的距离;

R_q 为节点的覆盖半径; R_s 为节点的最大测量覆盖半径, 当 $R_q = R_s$, 为工作邻居; R_t 为节点的最大通信覆盖半径, 当 $R_q = R_t$, 为类首邻居。

3.2 SEENR协议分析及参数确定

1) 期望备选节点和期望备选类首数量 M_0 、 M_1 的确定。

假设节点均为相似的均匀分布, 则依据文献[9]可得到最少的覆盖节点数为:

$$M_{\min} \pi R_q^2 / A = 2\pi / \sqrt{27} \quad (5)$$

考虑到公式是基于多种先期假设上的, 同时为提高实际覆盖率, 通常适当增加覆盖点数, 得:

$$M_0 = k_0 \frac{2A}{R_s^2 \sqrt{27}}, \quad M_1 = k_0 \frac{2A}{R_t^2 \sqrt{27}} \quad (6)$$

式中 k_0 为放大倍数, 通常取1.2~2.0, 本文取1.3。

2) 冗余度 u 、 v 的确定。

冗余度: 节点被邻居的覆盖程度, 覆盖度越高, 节点成为冗余节点的可能性越大。DEAC协议中通过计算节点的邻居数来计算节点的冗余度, 判断节点为冗余节点的冗余度门限定义为 K , K 由经验确定。实际上, 冗余度随节点和邻居间的距离 $d_{(i,j)}^2$ 不同而不同, 不考虑 $d_{(i,j)}^2$ 必然会带来较大误差。由于, 当节点和邻居的距离 $d_{(i,j)}$ 为0时, 该节点可以完全被邻居取代, 冗余度为1, 当两者距离为节点覆盖半径 R 时, 根据文献[10], 邻居最多6个, 最少3个独立邻居(即邻居之间不是邻居)可以保证该节点的覆盖区域被邻居完全覆盖。此时, 冗余度为1/3~1/6, 取2/9。为了计算简单, 在 $d_{(i,j)} \in [0, R]$ 之间定义冗余度与 $d_{(i,j)}^2$ 成反比。所以计算公式可近似为:

$$u = \sum_j \begin{cases} \frac{R_s^2}{3.5d_{(i,j)}^2 + R_s^2} & 0 \leq d_{(i,j)} \leq R_s \\ 0 & d_{(i,j)} > R_s \end{cases} \quad (7)$$

$$v = \sum_j \begin{cases} \frac{R_t^2}{3.5d_{(i,j)}^2 + R_t^2} & 0 \leq d_{(i,j)} \leq R_t \\ 0 & d_{(i,j)} > R_t \end{cases}$$

式中 节点 j 为节点 i 的独立邻居。

3) 能量敏感系数 m 的确定。

由式(3)可以证明:

$$\frac{Q_{i_r}}{Q_{j_r}} = \frac{W_{j_r}^m}{W_{i_r}^m} \quad (8)$$

故选择不同的 m , 可改变算法对剩余能量的敏感度, 考虑到计算简便, m 一般可取为2。

4 性能评价

4.1 模拟实验环境设置和参数

模拟实验将对本文算法与LEACH、HEED和DEAC协议从以下性能指标进行评价: (1) 总体能量消耗。(2) 网络生存时间。(3) 覆盖率变化。

为能更接近真实, 试验采用美国加州大学伯克利分校设计的Mote节点的各项参数, 使用与文献[11]相同的能量模型与参数, 发送和接收数据的能量模型分别为:

$$E_{tr}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{amp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$E_{rx}(k) = kE_{elec} \quad (10)$$

式中 E_{elec} 表示启动收发电路消耗的能量; ϵ_{fs} 、 ϵ_{amp} 分别表示自由空间(fs)模型和多路衰减(apm)模型的放大器消耗能量; d_0 表示覆盖距离, 为常数取决于应用环境, 本文采用类首通信极限距离。试验参数如表1所示。

表1 试验参数

参数名	取值
节点分布区域	(0,0)~(100,100)
区域内随机分布节点数量	200
测量半径 R_s /m	10
簇类节点通信半径 R_t	25
SINK节点位置	(50,50)
类首通信极限距离	75
E_{elec} /nJ·b ⁻¹	50
ϵ_{fs} /pJ·b ⁻¹ ·m ⁻²	10
ϵ_{amp} /pJ·b ⁻¹ ·m ⁻⁴	0.013
每轮每节点传输的数据量/B	2 000
初始能量/J·battery ⁻¹	1
最小能量/J·battery ⁻¹	0.01

4.2 试验结果

试验结果如图1和图2所示。

图1结果表明, 由于LEACH、HEED协议都未考虑类首节点冗余覆盖问题, 覆盖冗余过多, 其网络能耗几乎比SEENRT协议高一倍, DEAC采用邻居信息, 解决了类首节点冗余覆盖, 情况较好。但DEAC未考虑工作节点休眠问题, 无法进一步减少网络能耗。图2结果表明, SEENRT协议在网络生存时间方面比LEACH、HEED和DEAC协议优秀, 其有效寿命(覆盖率大于90%)大约是LEACH协议的2倍。同时有效寿命占整个网络生存时间的比例, SEENRT协议最大, DEAC协议第二, 说明SEENRT协议平均节点负担的效果较好。

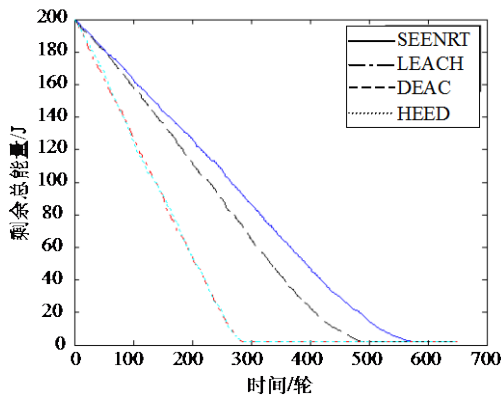


图1 网络剩余总能量与运行时间的关系

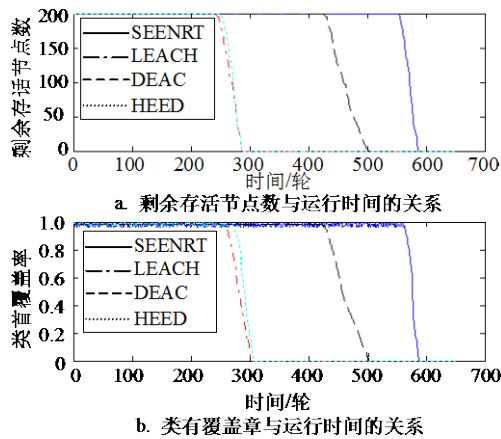


图2 剩余存活节点数、类首覆盖率与运行时间的关系

5 结论

本文在DEAC协议的基础上, 提出SEENRT协议, 该协议利用节点的剩余能量信息, 平均网络各节点的能量消耗; 利用邻居节点相关信息和节点休眠策略, 降低网络覆盖冗余, 减少网络能耗。和原有DEAC协议相比, SEENRT协议还优化了协议参数的确定方法, 从而提高了原算法的能量有效性和算法的稳定性。试验结果表明SEENRT协议比LEACH、HEED和DEAC协议网络能耗更低, 各节点的能耗负担更平均, 大幅度地提高了网络的生存时间。

参考文献

- [1] MANJESHWAR A, AGRAWAL D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2001: 2009-2015.
- [2] EINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks wireless communications[J]. IEEE Transactions, 2002, 1(4): 600-670.
- [3] YOUNIS O, FAHMY S. Distributed clustering in Adhoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach[C]//Proc 13th Joint Conf on IEEE Computer and Communications Societies. [S. l.]: IEEE, 2004: 629-640.
- [4] XU Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Geography-informed energy conservation for Ad-hoc routing[C]//Proc 7th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy: [s. n.], 2001: 70-84.
- [5] SANTI P. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks[C]//1st European Workshop on Wireless Sensor Networks. Berlin: [s. n.], 2004: 106-121.
- [6] 任代蓉, 雷霖, 胡学海, 等. 一种分布式高效节能的自适应传感器网络聚类协议[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(11):45-50.
REN Dai-rong,, LEI Lin, HU Xue-hai, et al. Distributed energy-efficient adaptive clustering protocol in wireless sensor networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies. 2007, 26(11): 45-50.
- [7] STOJMENOVIC I. Position based routing in Ad-hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(7): 128-134.
- [8] HE T, HUANG C, BLUM B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C]//Proc 9th Annual on Mobile Computing and Networking. San Diego: [s. n.], 2003: 81-95.
- [9] TIAN D. A coverage-preserving nod scheduling scheme for large wireless sensor networks[C]//Proc 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York: [s. n.], 2002: 32-41.
- [10] SHAH R C, RABACAERY J M. Energy aware routing for low energy Ad-hoc sensor networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conf. [S. l.]: IEEE, 2002, 3(1): 17-21.
- [11] HEINZELMAN W R. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless, 2002, 4 (1): 660-670.

编辑 张俊