

一种高效节能分布式传感器网络覆盖协议

李善仓, 张德运

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种分布式高效节能的传感器网络覆盖协议(CEP), 在保证网络性能的前提下, 每个节点将工作周期分为多轮, 在每轮中与邻居节点协商, 并根据剩余能量来调度自身的工作模式, 从而保证网络在每轮中以最少的节点处于工作模式, 同时保证能耗均匀地分布在工作节点之上。仿真结果表明, 随机均匀部署的传感器网络在满足覆盖度要求前提下的 CEP, 能使网络生命周期较 LEACH 方法延长了 200%, 计算复杂性降低 10%。该协议可以广泛应用于与传感器网络节点部署、拓扑控制以及目标监控等相关的领域。

关键词: 无线传感器网络; 网络生命周期; 覆盖度; 节能

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1132-05

Distributed High Efficiency and Energy-Saving Coverage Protocol of Wireless Sensor Networks

Li Shancang, Zhang Deyun

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel distributed high efficient energy-saving coverage protocol (CEP) of wireless sensor networks is proposed, in which under the premise that the performances of networks are guaranteed the work cycle of each node is divided into many rounds and in each round the node schedules work mode itself according the residual power after negotiating with its neighbor nodes. CEP can ensure that nodes are in active work mode as few as possible while ensuring energy is uniformly distributed over these nodes and others are in sleeping mode. Simulation demonstrates that when the nodes are deployed randomly and uniformly in sensor networks and satisfies the coverage requirements, CEP can extend the lifecycle of networks more about 200% than that of LEACH protocol, and computation complexity is decreased by 10%. The protocol can be used in related application areas such as node deployment, topology control and target tracking.

Keywords: wireless sensor network; network lifecycle; coverage degree; energy-saving

无线传感器网络(WSN)是随着无线通信技术、嵌入式技术、传感器技术以及微机电技术的迅速发展而出现的一种新型网络, WSN 目前仍存在许多亟待解决的问题, 如节能、部署覆盖和路由规划等, 其中覆盖度对传感器网络的生存时间、部署策略、通信协议和组网等具有十分重要的影响。

本文设计了一种新型节能的节点调度算法: 在每个周期的初始阶段, 首先计算每个节点的剩余能

量并将所剩能量值向周围节点进行广播, 然后收集邻居节点的信息, 根据邻居节点能量值进行排序, 再依每个邻居节点监控区域的交集计算覆盖交集的节点状态激活的起始、结束时间; 在感知段, 根据能量值对激活的起始、结束时间进行自适应更新。

1 系统模型和问题描述

定义 1 节点覆盖区域为节点感知半径的区域, WSN

位便静止不动(本文节点置于二维平面).

假设 2 邻居节点之间为毫秒级时间同步,节点在每个周期的 T_{init} 段必须进行时间同步.

假设 3 邻居节点之间可以互相通信,节点感知半径约为 25 m.

2.1 1-CEP 协议

(1) T_{init} 段的协议步骤描述如下.

步骤 1: 配置节点基本参数,给定节点的感知半径 r_{sen} 、期望生命周期 $f^{(1)}(\gamma)$ 和覆盖度 k ,并在保证某区域为 k -覆盖时求出该区域的节点布置密度.

步骤 2: 启动一个定时器,如果判断节点在第一个周期工作,则以二进制退避算法向周围节点发送 HELLO 消息,第一次消息包含的参数为预设参数.

步骤 3: 启动 HELLO 消息收集定时器,接收邻居节点的 HELLO 消息,同时节点根据自身与邻居节点的距离来建立邻居列表 $N(s_i) = \{s_j \in V | d(s_i, s_j) \leq r_c, i \neq j\}$.

步骤 4: 对邻居节点列表中的节点进行时间同步. HELLO 消息包含了一个时间同步字段,每个节点除了维护自身时钟 T_{local} 外,还要维护全局时钟 T_{global} ,而整个 WSN 设置了一个时间晃动 T_{skew} . 若 $T_{\text{local}} \in [T_{\text{global}} - T_{\text{skew}}/2, T_{\text{global}} + T_{\text{skew}}/2]$,则 HELLO 的时间字段直接发送 T_{global} ;若 $T_{\text{local}} \geq [T_{\text{global}} - T_{\text{skew}}/2, T_{\text{global}} + T_{\text{skew}}/2]$,则需要调整 T_{local} ,使其为 $(\sum_{i=1}^N T_{\text{global}})/N$.

步骤 5: 根据每个节点及其与邻居节点之间的能量,选择一个节点的参考时间 $t_{\text{Refi}} = \text{randm}(0, 1) \cdot T_{\text{sen}} E_i / \sum_{j=1}^N E_j$,并计算 t_{Fi} 和 t_{Ei} . 令节点监控区域中的任意点为 p ,在邻居列表中寻找覆盖 p 的集合并加入到集合 $C(p)$ 之中($C(p)$ 的初始值仅为节点自身),这样所有覆盖 p 的节点可构成一个集合 $C(p)$. 集合按照能量升序排列,形成列表 $L(p)$,且首尾连接构成一个环,然后根据公式

$$t_{\text{Fi},i} = [(t_{\text{Refi}} - \text{prev}(t_{\text{Refi}})) \bmod T_{\text{md}}] E_i / \sum_{j=1}^N E_j \quad (2)$$

$$t_{\text{Ei},i} = [(t_{\text{Refi}} - \text{next}(t_{\text{Refi}})) \bmod T_{\text{md}}] E_i / \sum_{j=1}^N E_j \quad (3)$$

$$t_{\text{Fi}} = \max(t_{\text{Fi},i}); \quad t_{\text{Ei}} = \max(t_{\text{Ei},i}) \quad p \in P \quad (4)$$

求出每个节点的 t_{Fi} 和 t_{Ei} .

步骤 6: 节点在完成参数更新之后,等待定时器超时,随之进入 T_{sen} 段.

(2) T_{sen} 段协议描述如下.

s_i 的感知段分为 R 轮, R 的大小由应用的实时性决定,若轮长为 T_{md} ,在第 R 轮的 $[t_{\text{Fi}}, t_{\text{Ei}}]$ 中设置节点为激活工作模式,并对周围事件进行监控处理,在其他时段,节点为休眠工作模式. 图 2 为 s_i 在一轮中的状态迁移图(1-CEP 协议).

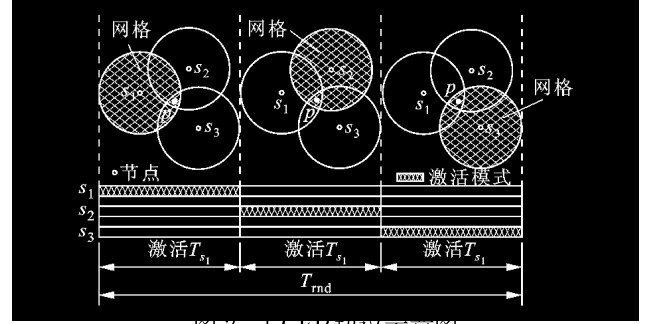


图 2 1-CEP 协议示意图

2.2 k-CEP 协议

当一个监测区域内 A 的任意点 p 被 k (k 不能大于网络覆盖度) 个节点覆盖时,可应用与 1-CEP 协议同样的方法,并按公式

$$t_{\text{Fi},i}^{(k)} = \begin{cases} [(t_{\text{Refi}} - \text{prev}(t_{\text{Refi}}, \frac{k}{2}) / \bmod T_{\text{md}}] (E_i / \sum_{j=1}^N E_j) & \text{if } k \text{ is even} \\ [(t_{\text{Refi}} - \text{prev}(t_{\text{Refi}}, \frac{k}{2}) + t_{\text{Fi},i'}) / (\bmod T_{\text{md}} E_i / \sum_{j=1}^N E_j) & \text{if } k \text{ is odd} \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{\text{Ei},i}^{(k)} = \begin{cases} [\text{next}(t_{\text{Refi}}, \frac{k}{2}) - (t_{\text{Refi}})] / (\bmod T_{\text{md}} E_i / \sum_{j=1}^N E_j) & \text{if } k \text{ is even} \\ [\text{next}(t_{\text{Refi}}, \frac{k}{2}) + t_{\text{Ei},i''} - (t_{\text{Refi}})] / (\bmod T_{\text{md}} E_i / \sum_{j=1}^N E_j) & \text{if } k \text{ is odd} \end{cases} \quad (6)$$

求解 s_i 对 p 满足 k -覆盖时的参数 $t_{\text{Fi},i}^{(k)}$ 、 $t_{\text{Ei},i}^{(k)}$,即当 s_i 在 T_{sen} 段的每一轮和在 $[t_{\text{Fi},i}^{(k)}, t_{\text{Ei},i}^{(k)}]$ 中处于激活工作模式时,点 p 满足 k -覆盖.

在式(5)、式(6)中, $\text{prev}(t_{\text{Refi}}, m)$ 表示 s_i 的邻居节点队列 $N(s_i)$ 中前面第 m 个邻居节点的参考时间, $\text{next}(t_{\text{Refi}}, m)$ 表示 $N(L)$ 中第 m 个节点的参考

时间, i' 表示参考时间为 $t_{\text{Ref}i'} = \text{prev}\left(t_{\text{Ref}i'}, \left[\frac{k}{2}\right]\right)$ 处的节点, i'' 表示参考时间为 $t_{\text{Ref}i''} = \text{prev}\left(t_{\text{Ref}i'}, \left[\frac{k}{2}\right]\right)$ 的节点. $t_{\text{Fp},i'}$ 和 $t_{\text{Ep},i''}$ 的定义与 1-CEP 中的定义是一样的, 其他过程与 1-CEP 协议类似, 则 s_i 的工作模式可以由 $t_{\text{Fi}}^{(k)} = \max_{p \in P} [t_{\text{Fp},i}^{(k)}]$, $t_{\text{Ei}} = \max_{p \in P} [t_{\text{Ep},i}^{(k)}]$ 来确定. s_i 在 $[(t_{\text{Ref}i} - t_{\text{Fi}}^{(k)}) \bmod T_{\text{md}}] \sim [(t_{\text{Ref}i} + t_{\text{Ei}}^{(k)}) \bmod T_{\text{md}}]$ 时间段处于激活工作模式, 在其他时间处于休眠工作模式, 其初始段算法与 1-CEP 算法基本一致, 其感知段算法如图 3 所示.

```

Procedure Each_Sensing_Round begin
(1) CheckTimer();Switch(sleeping);
(2) CaculateMaxP(sensing field);
(3) Caculate_Max $t_{\text{F}}$ _Max $t_{\text{E}}$ ();Max  $t_{\text{Fp},i}$ ,  $t_{\text{Ep},i}$  from (6),(7)
(4) UpdateEnergy( $E_i$ );
(5)  $t_{\text{Fi}} = \text{Max}(t_{\text{Fp},i})$ ;  $t_{\text{Ei}} = \text{Max}(t_{\text{Ep},i})$ ;
(6) if ( $T_{\text{local}} - t_{\text{Fi}} \leq e$ ) {
(7)   SetActiveTimer(); //set the duty-time
(8)   SetSleepTimer(); //set the duty-off-time
(9)   Switch(active);}
End_Procedure

```

图3 T_{sen} 段每轮中的工作模式调度算法

3 性能评估

3.1 模拟实验环境设置和参数

本文采用 PowerTOSSM 仿真平台来精确描述每个周期中各个硬件模块的能量消耗, 其中发送数据和接收数据的无线通信模型分别为

$$E_{\text{Tr}}(k, d) = E_{\text{elec}}(k) + E_{\text{amp}}(k, d) = \begin{cases} kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{fs}}d^2 & d < d_0 \\ kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{amp}}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{\text{Rx}}(k) = kE_{\text{elec}} \quad (8)$$

式中: E_{elec} 表示无线收发模块的耗能; ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 分别表示自由空间模型和多路衰减模型的放大器耗能; d_0 为常数. 其他参数详见表 1.

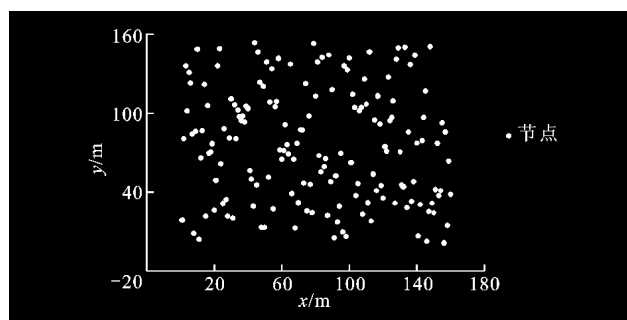
3.2 实验结果

为了验证 CEP 协议的性能, 在 $160 \text{ m} \times 160 \text{ m}$ 的区域中随机、均匀部署 100 个节点, 节点的分布如图 4 所示. 由于节点随机均匀分布且每个节点的 $r_{\text{sen}} = 10 \text{ m}$, 显然它们可完全覆盖区域 $A \{(0, 0), (160, 160)\}$, 这大大超出了式(1)的求解结果. 在实验中, 经运行 CEP 协议之后, 每一轮处于激活的节点也完全覆盖了整个区域 A.

通过实验主要考察了以下 4 方面内容.

表1 实验参数

参数	数值	参数	数值
网络尺寸/ m^2	160×160	$\epsilon_{\text{emp}} / (\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1}) \cdot \text{m}^{-2}$	0.013
节点数	100	轮	100 ms
r_i / m	25	初始能量/J	2
$E_{\text{elec}} / \text{nJ} \cdot \text{b}^{-1}$	500	$\epsilon_{\text{emp}} / (\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1}) \cdot \text{m}^{-2}$	0.013
$\epsilon_{\text{fs}} / (\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1}) \cdot \text{m}^{-2}$	10	$E_{\text{min}} / \text{J}$	0.02
数据包报头/B	25	广播包大小/B	25

图4 在 $160 \text{ m} \times 160 \text{ m}$ 区域中 100 个节点的布置

(1) 能量消耗. 图 5 反映了监测区域 A 中部署 100 个节点时的 WSN 整体能耗, 从中看出, 运行中的 WSN 的整体能量在不断减少, 而在满足了监测应用性能的情况下, 处于激活的节点数量不断增多, 但其 WSN 能耗却呈下降趋势. 当出现死亡节点时假定网络生命周期截止, 可以看到 CEP 的节点死亡速度和覆盖率下降速度比 LEACH、BasicCP^[3] 协议的好一些. 当 $k=4$ 时, k -CEP 协议性能较 LEACH、BasicCP 协议更好, WSN 网络寿命几乎是 LEACH 协议的 4 倍, 比 BasicCP 协议延长了大约 66%. 随着网络的运行, CEP 的网络覆盖率下降也比较平缓, 在 37% 网络寿命中仍可以提供 90% 以上的覆盖率, 这说明 CEP 协议可以提供良好的覆盖质量且能提高网络寿命.

(2) 覆盖度. 节点覆盖度对网络寿命影响较大, CEP 和 BasicCP 协议在每个周期的 T_{init} 段都对网络拓扑进行了重构, CEP 协议依据节点剩余能量来选择其在 T_{sen} 段的工作模式, 所以它避免了能耗的冗余. 当覆盖度较大时, 覆盖度对协议能耗影响极大, 当 $k=4$ 时, k -CEP 协议几乎要比 LEACH 节省能耗 50%. 不同覆盖度下运行周期为 500 ms 时的剩余能量如图 6 所示.

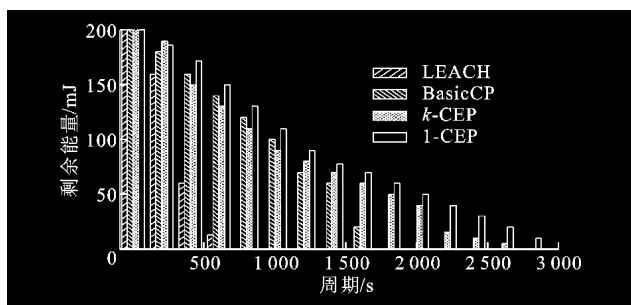


图5 能量消耗与运行周期的关系

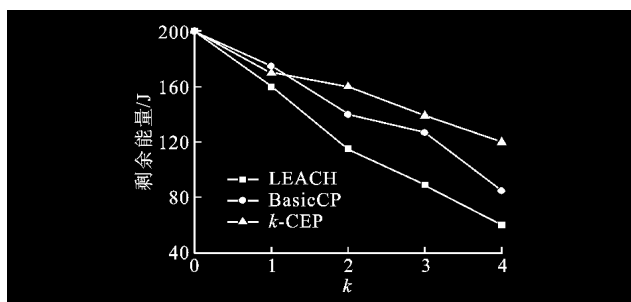


图6 覆盖度与 WSN 寿命的关系

(3)能量均衡. 图7为运行 CEP 协议时网络单节点能耗的分布. 在周期为 500 ms 时, LEACH 协议的能量分布方差已经达到 30% 左右, 所以从能量的均衡性上看, CEP 协议更具优势.

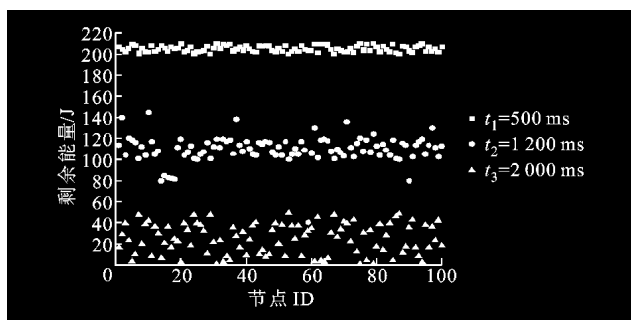


图7 节点能耗的均衡性

(4)传感器网络的生命周期. 图8反映了网络生命周期与部署节点之间的关系. CEP 协议选取的工作节点仅与监测区域的大小和节点分布有关, 随着节点数量的增加, 网络寿命呈线性增长, 当节点数为 300 时, CEP 协议较 BasicCP 协议的网络生命周期延长了大约 40%. 当节点数从 25 增加到 300 时, LEACH 协议的生命周期增加了 10%, 而 CEP 协议的生命周期延长了 200%.

4 结束语

本文提出一种分布式高效节能的传感器网络覆

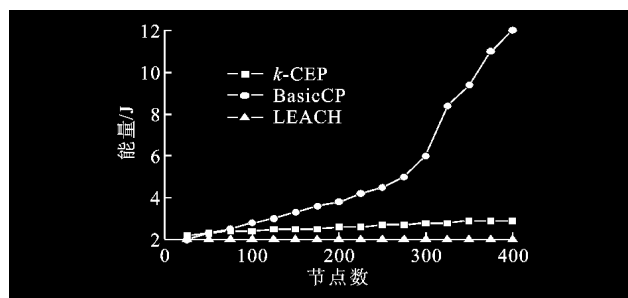


图8 部署节点数目与网络寿命周期

盖协议(k -CEP). 在 CEP 协议中, 节点通过与邻居节点交换信息并根据能量的大小来调度工作模式, 在无线传感器网络满足监控区域覆盖度的前提下, 整个网络能耗最小且均匀地分布到了每个节点上, 此时网络的生命周期最大. 仿真结果表明, 在满足一定覆盖度的前提下, CEP 协议不仅可以提供高覆盖性能, 而且在整体能耗与节点能耗均衡方面也具有良好的性能.

参考文献:

- [1] 毛莺池, 刘明, 陈力军, 等. DELIC: 一种高效节能的与节点位置无关的传感器网络覆盖协议 [J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(2): 187-195.
Mao Yingchi, Liu Ming, Chen Lijun, et al. A distributed energy-efficient location-independent coverage protocol in wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(2): 187-195.
- [2] 石高涛, 廖明宏. 大规模传感器网络随机睡眠调度节能机制 [J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(4): 579-585.
Shi Gaotao, Liao Minghong. Stochastic sleeping for energy-conserving in large wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(4): 579-585.
- [3] Huang Chifu, Lo Lichu, Tseng Yuchee, et al. Decentralized energy-conserving and coverage-preserving protocols for wireless sensor networks [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2006, 2(2): 182-187.
- [4] Wang Yongcai, Zhao Qianchuan, Zheng Dazhong. Energy driven adaptive clustering data collection protocol in wireless sensor networks [C]// Proceedings of International Conference on Information Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 599-604.

(编辑 苗凌)