

太阳能补给下无线传感器网络分簇路由算法 *

张玉娟¹, 樊晓平¹, 刘少强¹, 陈志杰¹, QU Zhi-hua^{1,2}

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 美国中佛罗里达大学 电气与计算机工程系, 奥兰多 佛罗里达 32816-2450)

摘 要: 分析太阳光照特点, 设计了太阳能补给模型, 并在此模型下提出了一种自适应的分簇路由算法 ACSP, 定义了网络有三种状态: 耗能期、储能期、稳定期, 并适应各个时期设计不同的簇首选择和路由选择机制。理论和实验表明, ACSP 可自适应网络中能量变化, 充分利用补给能量, 并且具有较好的能耗均衡性。

关键词: 无线传感器网络; 太阳能补给; 分簇路由; 自适应; 能耗均衡

中图分类号: TP393; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0260-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.072

Research of clustering routing of wireless sensor network
based on solar power supplying situation

ZHANG Yu-juan¹, FAN Xiao-ping¹, LIU Shao-qiang¹, CHEN Zhi-jie¹, QU Zhi-hua^{1,2}

(1. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Dept. of Electrical Engineering & Computer Science, University of Central Florida, Orlando FL 32816-2450, USA)

Abstract: This paper analyzed the characteristics of solar power, and designed a solar energy supplying model. According to this model, it proposed an adaptive clustering routing algorithm ACSP. ACSP divided the network to three stages: energy consumption, energy storage and stable period. In each period, designed cluster head selecting and routing mechanism adapting the energy situation. Simulation results show that ACSP can adapt the energy changing of the network, at the mean time, it has a better energy balance.

Key words: wireless sensor networks; solar power supplying; clustering routing; adapting; energy balance

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)的应用环境中普遍存在着能量, 如太阳光照、机械振动、温度、压力、速度等。若能将这些能量采集并应用在 WSN 中, 即可缓解节能与性能要求之间的矛盾, 改善传统 WSN 能量受限制约其生命周期的问题。现阶段已有许多学者致力于节点环境能量采集(ambient power harvesting, APH)^[1]的研究。在人们研究开发的光、热、风和机械运动等环境能源中, 太阳能和机械振动是 WSN 一般应用环境中普遍存在的, 其中太阳能技术相对成熟。当节点具有从环境采能的能力时, 节点剩余能量不再只是仅由电池供电时的单调下降情况, 一方面, 从环境补给能量存在时变性和随机性; 另一方面, 由于电池容量的限制、随充电电压减小储能效率降低、电能泄漏以及能量转换的双向性等因素, 促使节点需要在高效采能的同时, 还要高效管理和高效利用所采集的能量, 尽量避免能量溢出浪费和采能装置的附加损耗^[2]。研究能量补给情况下的 WSN 路由算法对 WSN 的应用及 WSN 本身技术的发展都有重要意义。

在具有环境采能的无线传感器网络的研究方面, 国外已有一些研究报道, 其中以太阳能补给的 WSN 的研究为主且大多关注节点设计和网络能量管理问题。文献[3, 4]均讨论了有太阳能补给的传感器节点的设计。这几篇文献均侧重于节

点硬件技术的研究, 而未对路由算法进行探讨。针对路由问题的研究很少, 国内同题的研究论文只有文献[5]见报, 提出了一种有能量补给的分簇路由算法(power-harvesting clustering, PHC)。PHC 算法考虑振动能量补给情况, 能量补给规律采用正态分布的随机补给规律, 分簇路由算法中考虑节点剩余能量和能量补给情况选择簇首, 使节点剩余能量高且能量得到补给的节点当选簇首的概率大, 算法侧重分簇阶段, 对路由没有多的介绍。

本文提出了一种基于太阳能补给的自适应分簇路由算法(adaptive clustering routing based on solar power supplying, ACSP)。该算法根据太阳能补给特点将网络分为三个时期: 耗能期、储能期、稳定期, 研究设计了适应三个时期各自能量供应状态下的簇首选择算法和合理调节发射功率利用补给能量的方法, 可自适应能量补给的变化。

1 理论基础

本文考虑在一个边长为 a 的正方形监测区域内随机分布 N 个传感器节点, 周期性进行数据监测与发送。假设条件如下:

a) 基站 BS(based station)位于区域中心, 能量不受限制。

收稿日期: 2011-05-24; **修回日期:** 2011-07-01 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(608070010, 60776834)
作者简介: 张玉娟(1986-), 女, 山西中阳人, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络(861204779@qq.com); 樊晓平(1961-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、机器人控制、智能交通系统等; 刘少强(1964-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、智能信息处理等; 陈志杰(1968-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为列车无线通信系统、铁路专用全球移动通信(GSM-R)、无线传感器网络等; QU Zhi-hua(1963-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为非线性系统、机器人控制、网络化控制等。

- b) 所有节点是同构的,初始能量为 $E_{\max}$,均具有数据融合功能,每个节点有唯一的ID标志,一旦部署位置不再发生变化。
- c) 每个节点都有太阳能采集、存储功能,存储的能量随时间在一定幅度内随机变化,当能量存储到达 $E_{\max}$ 时,能量值不能再上升。
- d) 每个节点可以根据接收者的距离远近调节其发射功率。
- e) 网络分三种状态:耗能期,包括没能量补给或能量补给率小于耗能率两种情况;储能期,能量补给率大于耗能率;稳定期,能量补给率与耗能率维持平衡。工作模式如图1所示。

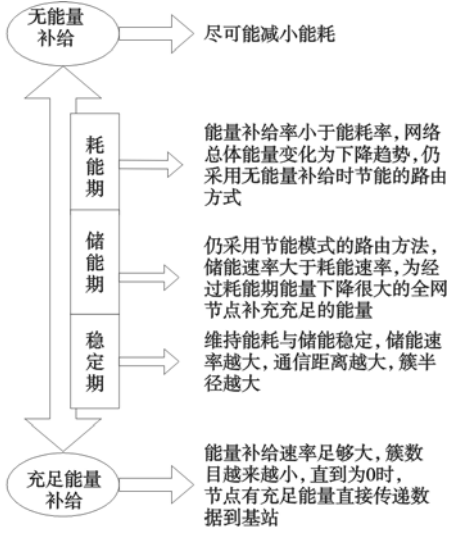


图1 网络三种状态下工作模式

2 算法描述

2.1 太阳能能量补给模型

太阳能补给的特点:同一天,正午左右光照最强,夜间无光照;同一时间,不同位置的节点因为所处位置不同采光率不同。根据此特点,本文设定的太阳能补给模型为梯形模型,平均补给值最小为0,最大为支持全网节点最大功率直接与基站通信的平均能耗值,模型如下:

$$\bar{E}_{up}(r) = \begin{cases} kr & r \leq r_1 \\ E_{\max} & r_1 < r < r_2 \\ E_{\max} - k \times (r - r_1) & r \geq r_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中: k 为上升斜率; $E_{\max}$ 为节点最大功率功率时,全网平均能耗值; r_1 、 r_2 为能量补给模型中补给值上升到最大值时的轮次和从最大值开始下降的轮次,如图2所示。

$E_{up}(r)$ 为第 r 轮全网节点能量补给的平均水平,由于各节点所处位置不同,能量补充水平不尽相同,各节点的能量补给具体值在 $E_{up}(r)/2 \sim E_{up}(r)$ 内随机取。

2.2 簇首选择概率模型

耗能期,节点当选簇首的阈值:

$$T(i) = \frac{p}{1 - p \bmod(r, \text{round}(1/p))} \times \frac{E(i)_{\text{residual}}}{E_{\text{direct-to-sink}}} \quad (2)$$

其中: p 为簇首节点占节点总数的百分比; r 为当前轮次; $E(i)_{\text{residual}}$ 为当前节点的剩余能量; $E_{\text{direct-to-sink}}$ 为节点与基站直接通信需消耗的能量。

稳定期,节点当选簇首的阈值:

$$T_w(i) = T(i) \left(\frac{C}{E_{up-eve} - E_{use-min}} \right) \quad (3)$$

其中: E_{up-eve} 为本次分簇距上次分簇时间段内节点平均储能值;

$E_{use-min}$ 为节能模式工作时节点平均能耗值; C 取决于电池的储能能力(电池最大采能值)。

式(3)第二部分 $\frac{C}{E_{up-eve} - E_{use-min}}$ 考虑了节点的平均能量补

给和平均能耗两个因素。稳定期时,储能率大于能耗率, E_{up-eve} 越大, $T_w(i)$ 越小,节点当选簇首的概率越小,簇数目越少,则簇间跳距增大,跳数减少,能耗增大,数据传输到基站的速率增大。第一部分 $T(i)$ 中的簇首占节点总数百分比 p 由2.3节中最佳通信距离计算得到。

2.3 稳定期,最佳通信距离 d_{best}

2.3.1 d_{best} 及 p 的计算

假设边长为 a 的正方形区域,均匀分布 N 个节点,簇边长为 d ,如图3所示。簇内节点到簇首的通信距离为 d ,簇首间通信距离为 $2\sqrt{2}d$,全网节点平均存储能量为 E_{up} ,为使全网平均能耗可等于 E_{up} ,即维持稳定,计算簇首间最佳通信距离 d_{best} 。

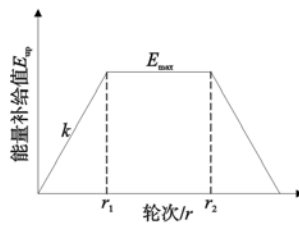


图2 能量补给模型

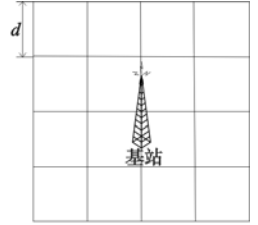


图3 网络分簇图

$$\text{簇数目: } N_{\text{cluster}} = a^2/d^2 \quad (4)$$

$$\text{簇内节点数: } N_{c_node} = Nd^2/a^2 \quad (5)$$

分簇后,从中心基站到外层的簇层数:

$$n = \text{round}(a/2d) \quad (6)$$

第 n 层簇数目:

$$N_{CH}(i) = 8i - 4 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

簇内节点能耗:

$$E_{CM} = E_{TX}(l, 2\sqrt{2}d) \quad (8)$$

簇首节点传递的数据包途中所需能耗:

$$E_{CH}(i) = N_{c_node} \times E_{RX}(l) + E_{TX}(l, 2\sqrt{2}d) \times H_{\text{hop}}(i) \quad (9)$$

其中: H_{hop} 为 i 层某簇将数据包传递到基站途中所需跳数。

簇内节点总能耗:

$$E_{\text{total}} = (N - N_{\text{cluster}}) \times E_{CM} + \sum_{i=1}^{N_{\text{cluster}}} E_{CH}(i) = (N - N_{\text{cluster}}) \times E_{CM} + N_{\text{cluster}} \times N_{c_node} \times E_{RX}(l) + E_{TX}(l, 2\sqrt{2}d) \times \sum_{i=1}^{N_{\text{cluster}}} H_{\text{hop}}(i) \quad (10)$$

簇内所有簇首发送的包的总跳数:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{cluster}}} H_{\text{hop}}(i) = \sum_{i=1}^n (8i^2 - 4i) = \frac{4n(n+1)(2n+1) - 6n(n+1)}{3} \quad (11)$$

$$\text{令 } E_{up} = E_{\text{total}} \quad (12)$$

即可求出理想状态下,能维持储能与能耗平衡的 d 值:

$$d_{\text{best}} = 2\sqrt{2}d \quad (13)$$

根据此 d 值可估算出稳定期时,式(3)中簇首节点占节点总数百分比 p 值:

$$p = d^2/a^2 \quad (14)$$

2.3.2 簇间路由选择机制

簇间多跳传输,若网络处于耗能期和储能期,选择下一跳簇首节点时,采用 $d_{i-\text{sink}}^2 < d_{i-j}^2 + d_{j-\text{sink}}^2$ 选择模式,满足上述公式条件,选择 $d_{i-j}^2 + d_{j-\text{sink}}^2$ 值最小的节点作为下一跳节点;若网络

能量存储于能量消耗维稳期,计算出的理想状态下簇间最佳通信距离 d_{best} , 距簇首距离小于 d_{best} , 若满足 $d_{i-sink}^2 < d_{i-j}^2 + d_{j-sink}^2$ 的下一跳节点数大于 1 时, 选择 $|d_{i-j} - d_{best}|$ 最小的节点作为下一跳节点。

3 仿真结果

3.1 实验参数

本文在 MATLAB 仿真平台进行实验。所有节点初始状态相同,150 个节点随机分布在 200 m×200 m 的区域内,数据传输轮次 800 轮。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

主要参数	参数值	主要参数	参数值
节点初始能量 E_0	0.5	E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m4
基站位置	(100,100)	E_{fs}	10 pJ/bit/m ²
数据包大小	4 000 bit	C	0.001
E_{elect}	50 nJ/bit		

图 4 为仿真过程中全网节点总能量补给模型,将时间换算为轮次。0~300 轮,能量补给值随时间上升;300~500 轮,能量补给值呈基本稳定状态;500~800 轮,能量补给值随时间下降。

3.2 实验结果分析

图 5 为本文 ACSP 算法与 LEACH、PHC 算法在同样的梯形能量补给模型下,全网节点剩余能量与轮次曲线图。可看出,耗能期,ACSP 更加节能;到 200 轮左右,补给能量刚好可维持全网节点工作而无须消耗电池能量;随着采能率升高,补给能量出现剩余,由于全网节点平均剩余能量未达到设定的阈值水平,所以节点仍以节能模式工作,多余的补给能量用于电池储能,为下一个耗能期做准备;当达到设定阈值时,进入稳定期,可维持储能与耗能稳定,避免能量溢出浪费;620 轮左右,再次进入耗能期。

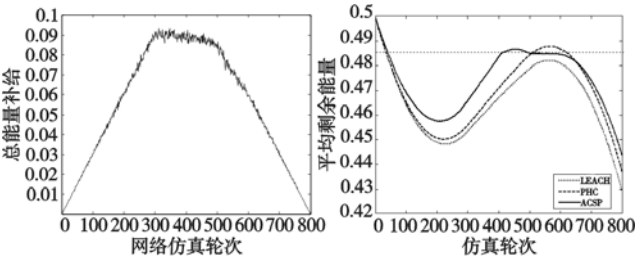


图4 全网节点总能量补给模型 图5 节点每轮平均剩余能量

图 6~8 分别为 ACSP、LEACH、PHC 算法在同样能量补给模型下全网节点剩余能量图。可看出 800 轮数据传输后,图 7、8 节点剩余能量值范围较广,ACSP 算法节点剩余能量值较 LEACH、PHC 算法更集中,说明 ACSP 算法较 LEACH、PHC 算法能耗更均衡。

4 结束语

本文提出一种自适应太阳能补给的 WSN 分簇路由算法 ACSP,做出了三点创新:a) 分析了太阳光照的特点,设计了太阳能能量补给模型,并根据能量补给特点将网络分为三个时期:耗能期、储能期、稳定期;b) 能量补给充足时,计算最佳通信距离作为路由选择的基准;c) 根据最佳通信距离估算出簇首节点占总节点数百分比,并将节点能量补给速率、能耗速率、剩余能量值三个因素作为簇首选择权衡因子,选出最佳簇首。理论和实验表明,ACSP 算法能实时适应网络中能量补给情况,充分利用补给能量,避免了能量溢出浪费,且节点能耗较 LEACH、PHC 算法更均衡。

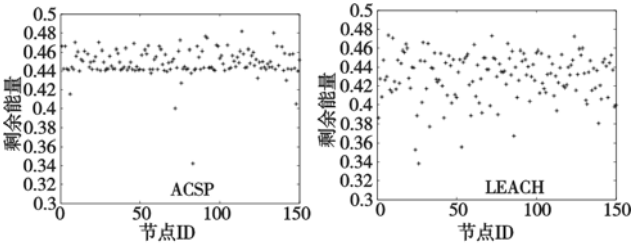


图6 ACSP算法节点剩余能量 图7 LEACH算法节点剩余能量

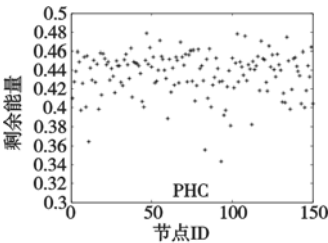


图8 PHC算法节点剩余能量

参考文献:

[1] MATEU L, MOLL F. Review of energy harvesting techniques and application for microelectronics[C]//Proc of SPIE. 2005;359-373.

[2] MOSER C, BRUNELLI D, THIELE L, et al. Real-time scheduling for energy harvesting sensor nodes[J]. Real-Time Systems, 2007, 37(3): 233-260.

[3] RAGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J, et al. Design consideration for solar energy harvesting wireless embedded system[C]//Proc of the 4th International Symposium on Information Proceeding in Sensor Networks. Piscataway: IEEE Press. 2005;457-462.

[4] GAO Yi, SUN Gui-ling, LI Wei-xiang, et al. Wireless sensor node design based on solar energy supply[C]//Proc of the 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. 2009;203-207.

[5] 樊晓平,杨玺,刘少强,等.具有能量补给的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 计算机工程,2008,11(34):120-123.

[6] 姜丽芬,卢桂章,辛运帷.射频识别系统中的防碰撞算法研究[J]. 计算机工程与应用,2007,43(15):29-32.

[7] 刘猛,徐展.RFID 中多标签识别缺陷与防碰撞算法分析[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2010(1):18-20.

[8] 亢军贤,张瑞生,夏禹,等.基于 RFID 的二进制防碰撞算法的改进[J]. 微计算机信息,2010(8):150-152.

[9] 陈冲,徐志,何明华.一种新的 RFID 防碰撞算法的研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2009,37(3):367-371.

[10] 谢振华,赖声礼,陈鹏.标签防碰撞算法设计[J]. 计算机工程,2008,34(6):90-92.

(上接第 259 页)

[3] LEONG K S, NG M L, GRASSO A R, et al. Synchronization of RFID readers for dense RFID reader environments[C]//Proc of International Symposium on Applications on Internet Workshops. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006;295-298.

[4] 余松森,詹彦巨,彭卫东.基于返回式索引的二进制树形搜索反碰撞算法及其实现[J]. 单片机工程与应用,2004,40(16):26-28.

[5] 鞠伟成,俞承芳.一种基于动态二进制的 RFID 抗冲突算法[J]. 复旦大学学报:自然科学版,2005,44(1):46-50.