

基于移动性优化 PSO 的 LEACH 路由算法

王长清, 巩彩红

(河南师范大学 物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007)

摘 要:针对 LEACH 算法存在随机选择簇首、没有考虑节点剩余能量对节点地位的影响以及节点位置和密集度不同造成节点能量失衡的问题, 研究使用移动性优化 PSO 来改进 LEACH 算法以均衡不同位置簇头间的能耗. 移动性优化 PSO 使粒子根据速度信息自适应调整参数进行搜索, 可避免因 PSO 算法早熟收敛、易陷入局部最优而导致的不能有效控制网络分簇均匀性的问题. 理论分析和仿真结果表明, 基于移动性优化 PSO 的 LEACH 路由算法可以有效地提高节点能量利用率, 均衡网络能耗, 延长网络生命周期.

关键词: LEACH; 移动性优化; PSO 算法; 网络分簇

中图分类号: TP393

文献标志码: A

无线传感器网络^[1-2](Wireless Sensor Network, WSN)使用的传感器节点大多由微电池供电, 且计算和存储能力有限. 因此设计出一种能够降低节点能量损耗、提高网络生命周期的路由算法显得尤为重要. 网络路由算法^[2-3]作为 WSN 的关键技术之一成为研究的重点.

LEACH 算法^[4-5]作为 WSN 中最早提出的分簇路由算法, 试图将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点, 从而达到均衡网络能量消耗、延长网络生命周期的目的. 但 LEACH 算法存在着簇首分布不合理而导致能量损耗不均的问题, 因此有必要对此算法进行改进来获得更优的性能.

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)作为一种进化算法, 通过群体中个体之间的协作和信息共享来实现复杂空间最优解的搜索. 目前已有国内外学者利用 PSO 算法对网络分簇算法进行改进的研究, 文献[6-11]均采用 PSO 算法优化选择分簇的方式, 起到了优化网络能耗的作用. 但是 PSO 存在早熟收敛、易陷入局部最优以及对大规模问题的搜索失败等一系列问题导致其不能有效的控制网络分簇的均匀性以及合理性, 因此本文提出一种移动性优化 PSO(mobile-optimized PSO, mPSO)算法, 并将其应用到路由分层算法中来更好的平衡网络能耗.

1 LEACH 算法及其不足

1.1 LEACH 算法分析

LEACH 算法中引入了轮的概念, 操作是分轮进行的. 每一轮由簇的建立阶段和稳态阶段组成. 簇的建立阶段实现网络分簇; 稳态阶段则进行数据的收集、处理和传输^[4-5, 10].

在簇建立阶段, 将所有节点划分为若干簇, 每个簇由一个簇头节点和多个成员节点组成. 具体的产生机制是: 每个传感器节点生成 0~1 之间的随机数, 如果该数值小于某个阈值 $T(n)$, 则该节点就为当前轮的簇头节点, 并向周围节点广播当选消息. $T(n)$ 的计算公式为

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金(61302187); 河南省科技攻关项目(122102310483).

作者简介: 王长清(1973-), 男, 河南安阳人, 河南师范大学副教授, 博士, 研究方向: 无线传感器网络, 物联网技术, 数字信号处理等.

通信作者: 巩彩红, E-mail: 273490911@qq.com.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times \left[r \bmod \left(\frac{1}{p} \right) \right]}, n \in G, \\ 0, \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

式中, p 为节点当选簇头的概率, 即网络中簇头节点占总节点数比例; r 是已完成的轮数; G 是前 r 轮中没有当选过簇头的节点集合; n 是前 r 轮中未当选过簇头的节点. 每个节点会在 $1/p$ 轮操作内充当一次簇头节点.

假定第 1 轮时 $r=0$, 从式(1)中可知, $T(n)=p$, 即为每个节点当选为簇头的概率. 节点通过轮流担任簇头来避免某个节点能量消耗过快, 那么充当过簇头的节点便不能成为其他轮中的簇头. 因此, 剩余能够成为簇头的节点数目变少, 节点产生小于 $T(n)$ 随机数的概率应该增大来保证每一轮中簇个数的均衡. 直到 $T(n)=1$. 由于所有节点产生的随机数均在 $0 \sim 1$ 之间, 因此前 r 轮中未当过簇头的节点均可成为簇头节点.

成为簇头的节点将利用 CSMA-MAC 协议对网络中所有节点广播一则消息, 此消息包含该节点成为簇头节点的信息. 非簇头节点收到来自各簇首的消息, 根据接收到的广播信号强度选择信号强度最大的簇头节点, 并发送加入请求. 簇头节点收到请求后采用 TDMA 的方式为簇内成员分配一个时隙表, 来避免数据拥挤; 簇形成后进入稳定阶段, 传感器节点将采集到的数据信息传送给簇头节点. 簇头节点对接收到的数据进行融合处理后传输给基站.

1.2 LEACH 算法不足之处

LEACH 算法具有所有节点轮流当选簇头的特点, 并采用分布式算法, 初步解决了网络负载平衡的问题. 但是它也存在一些不足之处.

- 1) 没有考虑节点剩余能量对节点地位的影响, 一旦剩余能量低的节点当选为簇头, 会加速节点的死亡.
- 2) 没有考虑节点的位置和节点密集度等因素, 远离簇首的节点通信时能量消耗快, 且节点密集区域的簇首要承担更多的数据处理和转发任务. 这对于整个网络的能量消耗具有重大影响.
- 3) 每个节点随机自主决定是否成为簇头, LEACH 算法不能保证簇头的数量、质量以及簇头节点的均匀分布.

本文针对上述 LEACH 算法存在的问题, 提出了一种 mPSO 的路由算法.

2 基于 mPSO 的 LEACH 路由算法的实现

2.1 mPSO 算法

mPSO 首先初始化一群随机粒子, 其中第 i 个粒子在 D 维解空间的位置和速度可分别表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 和 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$, 然后通过迭代找到最优解. 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己的速度和位置^[11-13]: 一个极值是粒子本身目前所找到的最优解, 称为个体极值 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$; 另一个极值是整个粒子群目前找到的最优解, 称为全局极值 $G_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{id})$. 第 $t+1$ 代的粒子根据式(2)和(3)更新自己的速度和位置

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 \xi_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 \xi_2 (g_{id}^t - x_{id}^t), \quad (2)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}, \quad (3)$$

式中, t 代表迭代次数, v_{id}^t 表示第 i 个粒子迭代 t 次时第 d 维的速度, x_{id}^t 则表示的是第 i 个粒子迭代 t 次时第 d 维的位置; ξ_1 和 ξ_2 是 $[0, 1]$ 内的随机数; c_1 和 c_2 为学习因子, 也称加速常数; ω 为惯性权重, 可随时间动态调整粒子速度, 使粒子逐渐趋向全局搜索.

经过数学推导^[13]可知, 搜索时粒子飞行速度大有利于全局搜索, 收敛速度快, 但难于得到精确解; 粒子飞行速度小有利于局部搜索, 能得到较为精确的解, 但收敛速度慢. 因此本文假设粒子的速度是以余弦规律变化的方式进行搜索的, 以便于粒子在开始搜索时保持较大的速度来提高搜索效率, 在后期能以较小的速度进行搜索来提高精度.

粒子理想速度的表达式为

$$v_i^t = v_s \frac{1 + \cos(pt/T)}{2}, \quad (4)$$

粒子群平均速度表达式为

$$v_a^t = \frac{1}{nd} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d |v_{ij}^t|, \quad (5)$$

式中, v_i^t 为粒子迭代 t 次理想速度; v_s 为理想初始速度, 为一个常量, 在这里定义为 $v_s = X_{\max} - X_{\min}$; 设 T_{\max} 为最大迭代次数, 则取 $T = 0.9T_{\max}$, 为理想速度以余弦规律变化的迭代次数; v_a^t 为粒子迭代 t 次的平均绝对速度, v_{ij}^t 即为 V^t 中第 i 个粒子在迭代 t 次时的第 j 维的速度. 为了保证粒子开始搜索时保持较大的速度, 在后期能以较小的速度搜索, 规定迭代次数 t 的范围为 $[0, \pi T/p]$.

惯性权重 ω 也影响着算法的收敛性能, 因此定义

$$\omega(t+1) = \begin{cases} \max\{\omega(t) - \Delta\omega, \omega_{\min}\}, & v_a^t \geq v_i^{t+1}, \\ \min\{\omega(t) + \Delta\omega, \omega_{\max}\}, & v_a^t < v_i^{t+1}. \end{cases} \quad (6)$$

即当粒子的平均速度大于理想速度时, 惯性权重取较小值, 反之则取较大值. 上式中, $\omega(t)$ 代表迭代 t 次的惯性权重; $\Delta\omega$ 为惯性权重步长.

mPSO 利用余弦变化规律对粒子的平均速度和理想速度进行改进, 并通过两者的比较自适应调整该算法的参数. 在长时间搜索情况下, 能保证粒子速度不会一直上升, 进而导致粒子飞出搜索空间; 又能保证粒子速度不会迅速下降而停止运动, 从而避免粒子陷入局部最优.

2.2 基于 mPSO 的 LEACH 路由算法的实现

新的路由算法首先应用 mPSO 来实现网络分簇: 假设网络中包含 N 个传感器节点, 计划将网络分为 K 个簇, 候选簇头数为 M , 则可能的分簇方式有 C_M^K 种. 每个粒子代表一种可能的分簇方式, 设置 m 个粒子组成的群体在 C_M^K 种可能的分簇方式中寻找最优解, 使目标函数取得最小值, 进而选择一种最佳的分簇方式. 本文定义目标函数如下.

$$\cos t = \beta f_1 + (1 - \beta) f_2, \quad (7)$$

$$f_1 = \max_{k=1,2,\dots,K} \{d(n_i, CH_k)\}, \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{\sum_{i=1}^N E(n_i)}{\sum_{k=1}^K E(CH_k)}, \quad (9)$$

式中, $d(n_i, CH_k)$ 为节点 n_i 到对应簇头的距离, f_1 则表示分簇紧凑评价因子; f_2 表示的是网络中所有节点的能量之和与所有簇头能量之和之比, 代表能量评价因子; β 表示各评价因子的权重系数.

优化后的分簇算法具体步骤如下.

- 1) 网络中所有的节点向基站广播自己的位置和能量信息, 基站收到报文后便执行 mPSO 对网络进行分簇, 初始化 Q 个粒子, 每个粒子包含 K 个候选簇头.
- 2) 按照公式(7)~(9)确定 Q 个不同的目标函数值, 并与上次搜索得出的最小值进行比较取最小, 得出整个粒子群的最优解 g_{best} ; 通过比较单个粒子的目标函数值取最小作为个体最优解 p_{best} .
- 3) 利用公式(2)~(6)更新粒子的速度信息与位置信息.
- 4) 粒子根据离得最近的候选簇头的信息来改变其位置, 重复步骤 2 至 4, 直到达到最大循环次数时退出. 此时, 网络分簇完成.

分簇结束后, 根据节点的剩余能量找到簇中合适的节点担任簇首. 计算节点的平均剩余能量, 簇内节点剩余能量高于或者等于平均剩余能量的节点成为候选簇头节点的概率较大. 此处借鉴 LEACH 的阈值公式, 加入能量因素, 将式(1)进行改进, 改进后的 $T(n)$ 表达式为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{\alpha p}{1 - p \left[r \bmod \left(\frac{1}{p} \right) \right]} + \frac{(1 - \alpha) p E_t}{E_{t-\text{all}}}, & n \in G, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (10)$$

式中, α 为影响因子, E_t 为 t 轮开始时节点的剩余能量, $E_{t-\text{all}}$ 为 t 轮开始时所有节点剩余的平均能量, 其他参数含义同式(1).

此后,基站发布分簇信息到网络中每个节点,进入稳态阶段.与 LEACH 算法的稳态阶段描述相同.

3 仿真结果与分析

本文利用 Matlab 进行仿真,将 mPSO 的 LEACH 与仅利用 PSO 进行改进的 LEACH 算法进行比较.本文采用与文献[4]相同的一阶无线通信能耗模型^[4],并分别在节点初始能量相同和初始能量不同两种情况下作比较.节点每次发送的数据量为 2 000 bit.网络环境参数如表 1 示.

表 1 仿真参数表

参数名称	数值
网络区域	(200 m×200 m)
基站坐标	(100 m,300 m)
节点数目	200
种群规模 Q	30
簇数目	10
最大循环次数	60
学习因子 c_1, c_2	2
评价因子权重系数 β	0.5
惯性权重初始值	0.9
惯性权重 ω_{max}	0.9
惯性权重 ω_{min}	0.3
能量影响因子 α	0.2

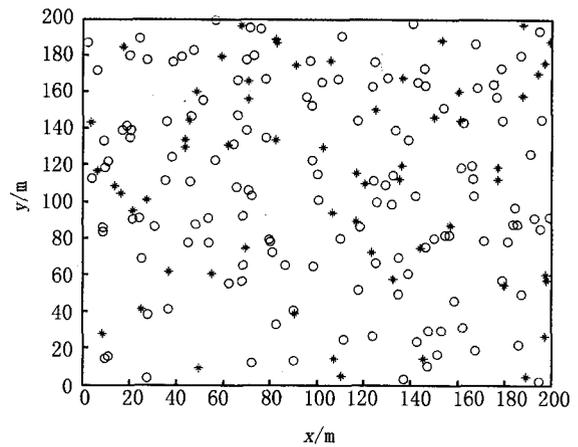


图 1 200个节点随机部署网络

如图 1 所示,200 个节点随机部署于设置区域内.当节点初始能量相同时,把初始能量设为 0.1 J,经过仿真得出 3 种算法的节点平均剩余能量的对比曲线.从图 2 中可以看出本文提出的基于 mPSO 路由算法的节点能量均值一直高于其他 2 种算法,而且 LEACH 算法与基于 PSO 的路由算法在能量均值低于某一值时便无法实现数据传输.这表明基于 mPSO 的 LEACH 路由算法能更有效的节约节点能量,均衡网络能耗.

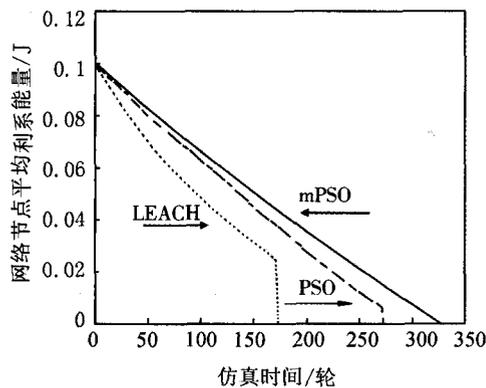


图 2 节点初始能量相同时节点平均剩余能量

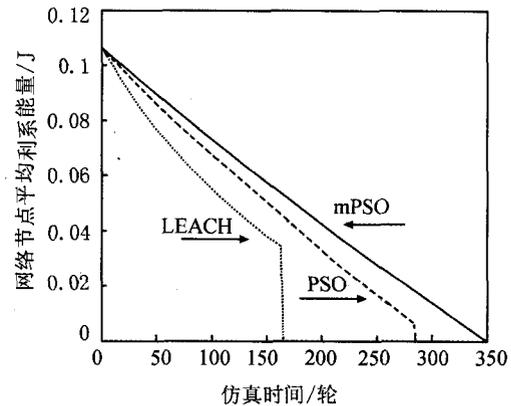


图 3 节点初始能量不同时的节点平均剩余能量

为了更充分地说明所提出的算法在能量均衡方面的性能,本文绘出了节点初始能量不同时 3 种算法的对比曲线,20%的节点初始能量设置为 0.05 J,其余设置为 0.12 J.仿真结果如图 3 所示,同样可以看出基于 mPSO 的 LEACH 路由算法能更好地均衡网络能耗,延长网络生命周期.

4 结论

针对 LEACH 算法中存在的不足以及 PSO 算法早熟收敛等造成网络分簇不均衡的问题,提出了基于 mPSO 的 LEACH 路由算法:mPSO 应用余弦规律变化的优势对粒子的理想速度和平均速度进行改进,避免粒子陷入局部最优.基于 mPSO 的 LEACH 路由算法使用 mPSO 实现网络分簇,确定目标函数时把距离和

能量因素考虑在内,从而选择出最佳分簇方式;簇头选择时在阈值中加入能量因子,进而有效降低了节点的死亡率.网络仿真表明,基于移动性优化 PSO 的 LEACH 路由算法能够有效地提高节点能量利用率,均衡网络能量损耗,延长网络生命周期.

参 考 文 献

- [1] Liu X. A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks [J]. SENSORS, 2012, 12(8): 11113-11153.
- [2] Ren F Y, Zhang J, He T, et al. EBRP: Energy-Balanced Routing Protocol for Data Gathering in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE T PARALL DISTR, 2011, 22(12): 2108-2125.
- [3] 冀天禄. 无线传感器网络路由协议设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [4] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [C]. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on IEEE, Hawaii, 2000.
- [5] Attea B A, Khalil E A. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [J]. APPL SOFT COMPUT, 2012, 12(7): 1950-1957.
- [6] 蒋畅江, 向敏, 唐贤伦. 基于 PSO 的无线传感器网络分簇路由协议 [J]. 计算机工程, 2012, 38(17): 59-62.
- [7] Jamali S, Rezaei L, Gudakahriz S J. An Energy-efficient Routing Protocol for MANETs: a Particle Swarm Optimization Approach [J]. J APPL RES TECHNOL, 2013, 11: 803-812.
- [8] Xu Y, Ji Y. A Clustering Algorithm of Wireless Sensor Networks Based on PSO [C]. The 3rd International Conference on AICI, Taiyuan, 2011.
- [9] Brits R, Engelbrecht A P, van den Bergh F. Locating multiple optima using particle swarm optimization [J]. Appl Math Comput, 2007, 189(2): 1859-1883.
- [10] Tyagi S, Kumar N. A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks [J]. J NETW AND COMPUT APPL, 2013, 36(2): 623-645.
- [11] Cai J, Sun J. A Clustering Routing Algorithm Based on Adaptive PSO in WSNs [C]. The 4th International Conference on WICOM, Dalian, 2008.
- [12] 邹学玉, 曹阳, 刘徐迅. 基于离散粒子群的 WSN 分簇路由算法 [J]. 武汉大学学报: 理学版, 2008, 54(1): 99-103.
- [13] 段海滨, 张祥银, 徐春芳. 仿生智能计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 67-77.

LEACH Routing Algorithm Based-on Mobility Optimization of PSO

WANG Changqing, GONG Caihong

(College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: To solve problems of the LEACH algorithm as the random selection of cluster head, leaving out the influence of the node residual energy on nodes location and intensity, the difference of the node location and intensity will lead to the node energy imbalance. The paper used the PSO algorithm with optimized mobility to balance the energy consumption between different cluster heads. The PSO algorithm can perform the search by adaptively adjusting the parameters according to the velocity, which can avoid the problem of network clustering uniformity caused by premature convergence and easily fall into local optimum of PSO algorithm. The theoretical analysis and simulation results show that proposed algorithm can effectively improve the utilization efficiency of node energy, balance the network energy consumption and prolong the network life cycle.

Keywords: low energy adaptive clustering hierarchy; mobility optimization algorithm; particle swarm optimization algorithm; network clustering