

基于免疫退火的 WSN 簇首节点选择方法研究*

陈志军¹, 李明²

(1. 义乌工商职业技术学院, 浙江 义乌 322000;
2. 重庆师范大学 计算机与信息科学学院, 重庆 401331)

摘要:针对无线传感器网络中簇首节点选择的问题,基于免疫退火提出了一种新的算法 CHSIA(Cluster head node selection algorithm based on immune annealing)。该算法结合节点能量消耗和剩余能量建立了目标函数 $f = \max\left(\frac{a}{elt} + bE(t-1)\right)$,并且利用免疫退火方法实现该目标函数的最优求解。同时,通过 OPENT 进行仿真实验深入研究了网络存活周期、变异概率和交叉概率等关键因素对该算法的影响。对于实验中 50%节点失效时的性能状况,CHSIA 算法能够延续到 162 轮,而 LEACH 算法只能延续到 119 轮,结果表明 CHSIA 具有较好的适应性。

关键词:无线传感器网络;簇首;剩余能量;免疫退火

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2014)02-0072-05

无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)^[1-4]作为物联网的主要支撑技术,具有广阔的发展前景。但由于每个传感器节点的电池容量有限,如何增加它的存活周期并降低节点能量消耗一直是研究的重点。而分簇作为 WSN 主要的路由协议,不仅能够提高数据转发效率,并且对于平衡节点能量消耗起到了非常重要的作用。

WSN 中簇的形成通常是根据轮来实现的,包括分簇和簇首节点选择^[5]。最早出现的典型分簇协议是 LEACH^[13],由于它没有考虑簇首节点的剩余能量以及初始位置不均匀性,容易导致节点能量快速损失,从而影响算法性能。后续的分簇协议大多以 LEACH 算法思想进行设计,比如 Hybrid energy efficient distributed clustering(HEED)、Energy efficient clustering scheme(EECS)、Distributed energy efficient unequal clustering(DEEUC)等。这些分簇方法可以划分为均匀分簇方法和非均匀分簇方法^[6-9]。均匀分簇方法通过构建规模近似相等的簇以提高能耗均衡程度,而非均匀分簇方法则通过构建规模不等的簇来实现能耗均衡。同时,在传输数据的过程中容易出现能耗不均衡现象,主要原因是:1)簇首节点需要发送和接收数据,而簇成员节点只需要发送数据,因此簇首节点与簇成员节点之间出现能耗不均衡;2)不同的簇首因为发送不同数据而造成能耗不均衡;3)不同簇首节点因为接收不同数据而造成能耗不均衡。传统策略是采用簇首轮换方式,由所有节点轮流承担簇首节点能耗,这样能够有效解决簇首节点与簇成员节点之间的能耗不均衡现象。但是这种方法未能充分考虑剩余能量过低的节点,造成这些节点加速失效。对于后两个主要原因,通常采用非均匀分簇方法来解决传输距离不等产生的能耗不均衡,将距离基站较远的簇首节点,降低它的簇成员节点数量。但是,现有的非均匀分簇方法没有考虑簇首的分布,并且簇成员节点不是始终选择距离最近的簇首,使得与该簇首节点的距离比其他簇首节点的距离更远,导致消耗更多的能量。

在此基础上,本文通过考虑 WSN 中节点能量消耗和剩余能量来建立簇首节点选择的目标函数,并且基于免疫退火^[10-11]优化目标函数,同时利用 OPNET 进行仿真实验,深入分析影响该算法的关键因素。本文结构如下:第 1 节阐述 WSN 的分簇及簇首节点选择方法,第 2 节利用免疫退火对目标函数进行求解,第 3 节进行了仿真实验,第 4 节对文章进行了总结。

* 收稿日期:2013-05-10 修回日期:2013-06-13 网络出版时间:2014-03-10 19:23

资助项目:浙江省社会科学界联合会研究课题(No. 2012N108)

作者简介:陈志军,男,讲师,研究方向为计算机软件与信息化技术, E-mail: chenjz1982@sina. cn

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20140310.1923.016.html>

1 分簇及簇首节点选择

针对图 1 所示的 WSN 结构,黑色圆圈代表簇首节点,白色圆圈代表簇成员节点。首先将 WSN 划分为大小相等的矩形区域(如图 1 中横线所示),在此基础上将每个矩形区域划分为大小不同的小矩形区域(如图 1 中虚竖线所示,称之为栅格)。栅格形成原则是距离基站越远,栅格面积就越大。这里给出簇的形成原则:

- 1) 在每个栅格中寻找剩余能量最大的节点,将它作为簇首节点;
- 2) 分别计算剩余节点与各簇首节点距离,选择距离最短者加入该簇;
- 3) 按照形成的簇进行数据发送和接收。

假设在相同距离下,传输单位数据量所需能量一样,传输数据消耗的能量与数据量大小和传输距离有关。因此,在选择各栅格的簇首节点时应充分考虑剩余能量以及传输距离。令某簇成员节点 i 向基站 S 发送 n 个数据量,它所需能量可以抽象为

$$e_{i,S} = e_{i,h} + e_{h,S} \quad (1)$$

其中, h 代表簇首节点, $e_{i,h}$ 为簇成员节点到簇首节点传输 n 个数据量所消耗的能量, $e_{h,S}$ 为簇首节点到基站 S 传输 n 个数据量所消耗的能量,并且 $e_{i,h}$ 和 $e_{h,S}$ 定义为

$$\begin{cases} e_{i,h} = n(e_0 + \lambda d_{i,h}^2) \\ e_{h,S} = n(e_0 + \lambda d_{h,S}^2) \end{cases} \quad (2)$$

这里, e_0 为节点发送或接收单位数据量所消耗的能量, λ 为单位距离的信道上传输单位数据量所消耗的能量, $d_{i,h}$ 为簇成员节点到簇首节点的距离, $d_{h,S}$ 为簇首节点到基站的距离。

同时,定义某时刻 t 该簇内所有节点通过簇首节点 h 向基站 S 发送数据所消耗的能量为

$$e(t) = \sum_{i \neq h} e_{i,S} \quad (3)$$

从另外一个角度来考虑簇首节点的选择问题,如果簇内某节点剩余能量越大,并且通过该节点向基站传输数据所消耗的能量和最小,那么该节点越有可能成为簇首节点。因此,这里定义如下目标函数 f 来判断某节点在 t 时刻成为簇首节点的可能性。

$$f = \max \left(\frac{a}{e(t)} + bE(t-1) \right) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} m_1 = \sum_{i \neq h} n_i \\ m = m_1 + m_2 \\ a + b = 1 \\ 0 < a < 1, 0 < b < 1 \\ n_i \geq 0, m_1 \geq 0, m_2 \geq 0, m \geq 0, E(t-1) \geq 0, e(t) \geq 0, d > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $E(t-1)$ 表示某节点在上一时刻 $t-1$ 的剩余能量, a 和 b 表示能量消耗和剩余能量的权重系数, m_1 表示该簇内簇成员节点向簇首节点发送的数据量, m_2 表示簇首节点自身向基站发送的数据量, m 表示基站收到该簇发送的数据量总和。通过求解目标函数 f 来判断某节点在下一轮成为簇首节点的可能性。 f 越大意味着它的可能性越大,反之则越小。同时,为了有效解决剩余能量过低的节点加速失效的问题,通常取 $b > a$, 尽可能避免能量过低的节点提前成为簇首节点。

2 免疫退火算法

目前,求解上述目标函数 f 可以采用线性规划或者启发式算法。但是当节点数目过多或 WSN 拓扑结构较

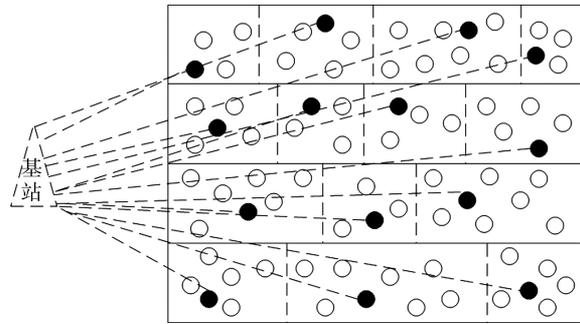


图 1 WSN 结构示意图

为复杂时,线性规划常常不能获得全局最优解。所以,这里考虑采用启发式算法进行求解。免疫退火算法结合免疫克隆和模拟退火的优势,首先通过模拟免疫系统的克隆机理,根据抗体与抗原的亲密度函数,经过克隆变异、交叉和选择操作后获得新的抗体群。而变异和交叉过程则以模拟退火接受准则来进行判断,当退火温度接近零时获得最优解。这样,既保持了解的多样性,又减少了算法的时间复杂度。对此,本文提出基于免疫退火的簇首节点选择算法 CHSIA,详细描述如下:

1)在某时刻 t 针对给定的 WSN 进行初始化,同时确定免疫退火算法中各参数:变异概率 p 和交叉概率 q ,初始温度 T_0 ,初始抗体群 Ω_1 等参数。

2)由 WSN 结构划分栅格数目,在每个栅格中选择节点剩余能量最大者作为簇首节点;

3)将 WSN 中的节点视作抗体群 Ω_1 的抗体,由目标函数 f 来确定 Ω_1 中每个抗体的亲密度 y ,用来衡量抗体与抗原之间的匹配程度。

$$y=1/(1+f) \quad (6)$$

4)根据下式对抗体群 Ω_1 中的第 j 个抗体进行克隆操作,获得新抗体群 Ω_2 ,它的种群数量为 N 。

$$N = \sum_j \lceil \theta M / j \rceil \quad (7)$$

其中, M 为初始抗体群 Ω_1 的种群数量, θ 为克隆系数, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

5)对抗体群 Ω_2 中的第 ω 个抗体执行克隆变异操作,根据(8)式产生子抗体 ω' ,以此形成抗体群 Ω_3 ;同时计算 ω 和 ω' 的亲密度 $y(\omega)$ 和 $y(\omega')$ 差值 $\Delta y=y(\omega')-y(\omega)$,根据(9)式来判断当前最优解,若(9)式成立则取 ω' 作为当前最优解,否则用 ω 来替代 ω' 作为当前最优解。

$$\omega' = \omega + \frac{(1-p)(1-\text{rand}())}{e^y} \quad (8)$$

$$1/e^{\Delta y/(1+T_t)} > \text{rand}() \quad (9)$$

这里,rand()产生(0, 1)之间的随机数。

6)产生(0, 1)的随机数 δ ,如果交叉概率 $q > \delta$,则按照(10)式和(11)式对抗体群 Ω_3 中的任意两个抗体 ω_1 和 ω_2 执行克隆交叉操作,并根据(9)式判断是否接受交叉后的子抗体 ω_{12} 和 ω_{21} ,以此产生新抗体群 Ω_4 。

$$\omega_{12} = (1-\delta)\omega_1 + \delta\omega_2 \quad (10)$$

$$\omega_{21} = \delta\omega_1 + (1-\delta)\omega_2 \quad (11)$$

7)执行退火操作,并且令 $t=t+1$,下一时刻 $t+1$ 温度 $T_{t+1}=T_t(1-t/M)$,如果 $T_t+1=0$,则退火过程结束,跳转到步骤(8),否则跳转到步骤(4),针对抗体群 Ω_4 重复执行上述操作,直至达到热平衡状态。

8)输出当前新的抗体群 Ω_4 中的抗体,即为下一时刻簇首的候选节点。

9)算法结束。

3 数学仿真

为了验证上述算法 CHSIA 的有效性,这里利用 OPNET 进行仿真分析。假设 WSN 中节点总数为 200 个,划分成 20 个栅格区域,各链路容量为 10 Mbps,延时 5 ms,各节点缓冲区容量为 256 packets,数据包大小均为 512 Byte。同时,令免疫退火算法的变异概率 $p=0.02$,交叉概率 $q=0.6$,初始温度 $T_0=1$,初始抗体群 Ω_1 的种群数量 $M=200$,克隆系数 $\theta=0.5$,目标函数权重系数 $a=0.3$, $b=0.7$ 。同时,将经典的分簇算法 LEACH^[12] 与 CHSIA 算法进行实验,以说明该算法的性能状况。首先,图 2 给出了这两种算法网络存活周期的比较情况,实验中假设当 WSN 中有 50%节点失效时它们的网络存活周期就结束。从图 2 可以看出,CHSIA 算法能够延续到 162 轮,而 LEACH 算法只能延续到 119 轮。这说明 CHSIA 算法在能量平衡上的处理比 LEACH 算法更加有效。为了能更加清楚说明这个问题,实验中进一步采用了不同节点数量进行分析(表 1),结果发现 CHSIA 算法均能更长延续网络存活周期。

进一步地,这里对 CHSIA 算法进行性能评价。图 3 给出了不同权重系数 a 下网络存活周期的变化情况。由于 a 和 b 分别表示能量消耗和剩余能量的权重系数,在仿真初始时刻,节点的剩余能

表 1 不同节点数目下网络存活周期比较

节点总数/个	网络生存周期/轮	
	CHSIA 算法	LEACH 算法
180	152	113
160	137	96
140	116	72
120	83	51
100	62	39

量普遍较大,此时加大对能量消耗的考虑必然能够有效延长网络存活周期,此时 $a=0.2$ (即 $b=0.8$)对应曲线的网络存活周期高于 $a=0.4$ 对应曲线。而在仿真后期,此时节点的剩余能量普遍较低,此时加大对剩余能量的考虑有利于延长网络存活周期,从而图 3 中 $a=0.4$ 对应曲线的网络存活周期高于 $a=0.2$ 对应曲线。

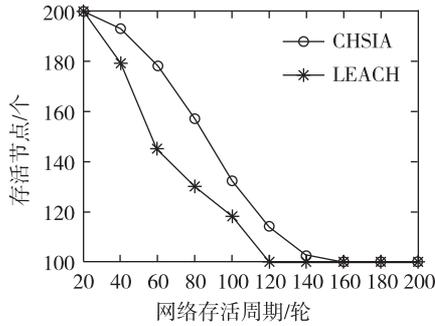


图 2 网络生存周期比较

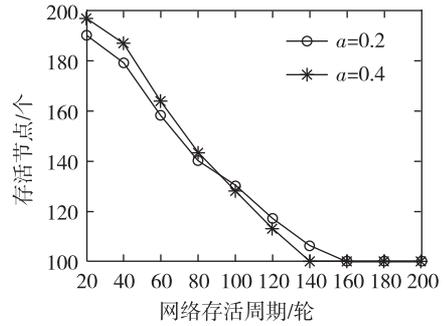


图 3 不同权重系数的网络存活周期比较

同时,图 4 和图 5 分别给出了不同变异概率 p 和交叉概率 q 下网络存活周期的变化情况。从图 4 可以看出,在仿真初期,失效节点数目较少,变异概率 p 越大对应的亲和度较大,变异的子抗体也就更容易被接受,那么网络的存活周期将越长;而在仿真后期,失效节点数目较多,变异概率 p 越小,执行克隆变异几率越大,对应的变异子抗体反而容易被接受,因此曲线出现跳变。并且在图 5 也存在类似现象。仿真初期交叉概率 q 越大对应的网络存活周期越大,而仿真后期情况发生跳变。这是因为失效节点的增加导致 WSN 连通度减少,发送数据能力减小,必然会引起发送数据冲突的增加,如果交叉概率 q 越小反而会减少冲突的发生,使得浪费的能量消耗降低,所以网络存活周期更长。

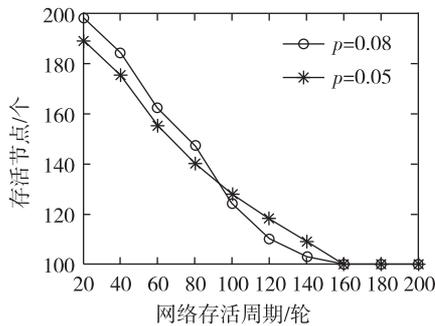


图 4 不同变异概率的网络存活周期比较

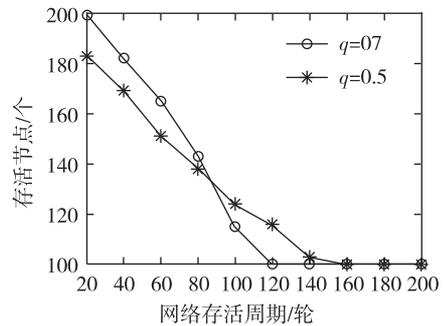


图 5 不同交叉概率的网络存活周期比较

最后,图 6 给出了不同初始温度 T_0 下节点剩余能量的变化关系。从整体上来看,节点剩余能量呈下降趋势,在仿真初期 T_0 越大对应曲线的网络存活周期越大,而仿真后期 T_0 较小对应的曲线的网络存活周期越小。这是因为仿真初期节点剩余能量普遍较大,适当提高初始温度有利于适应度增加,从而抗体能够更快收敛到全局最优,而在仿真后期情况正好相反。

4 结束语

本文针对 WSN 的分簇方法以及簇首节点选择问题提出了一种新的算法 CHSIA。首先,该算法利用栅格技术将 WSN 进行划分,并结合节点能量消耗和剩余能量定义了选择簇首节点的目标函数,同时基于免疫退火算法实现了该目标函数的快速求解。最后,在 OPNET 中进行仿真实验,对比研究了该算法与 LEACH 算法之间的性能状况,深入分析了影响 CHSIA 算法的关键因素,结果表明 CHSIA 具有较好的适应性。由于目前 WSN 发展迅速,应用广泛,在今后的研究中,对于 WSN 中传感器节点能量优化以及如何进行选路等问题是关注的重点和热点。

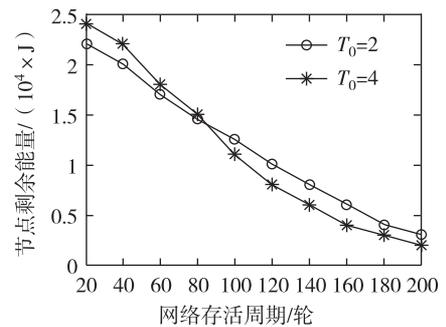


图 6 不同初始温度的节点剩余能量比较

参考文献:

- [1] Kalis A, Kanatas A G, Efthymoglou G P. A cooperative beam forming solution for eliminating multi-hop communications in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 1055-1062.
- [2] 周祖德, 胡鹏, 李方敏. 无线传感器网络分簇通信协议的可靠性方案[J]. *通信学报*, 2008, 29(5): 114-121.
Zhou Z D, Hu P, Li F M. Reliable scheme for the cluster-based communication protocol in wireless sensor networks [J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(5): 114-121.
- [3] Liu A F, Wu X Y, Chen Z G, et al. Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(3): 302-321.
- [4] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *IEEE Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [5] 刘琳, 于海斌. 异构无线传感器网络中簇首的优化部署策略[J]. *通信学报*, 2010, 31(10): 229-237.
Liu L, Yu H B. Optimal cluster head deployment in heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(10): 229-237.
- [6] 胡静, 沈连丰, 宋铁成, 等. 新的无线传感器网络分簇算法[J]. *通信学报*, 2008, 29(7): 20-26.
Hu J, Shen L F, Song T C, et al. Novel clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(7): 20-26.
- [7] 刘瑜, 衣晓, 何友. 高密度无线传感器网络分簇定位算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(8): 1581-1586.
Liu Y, Yi X, He Y. Cluster localization scheme for high-density wireless sensor networks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(8): 1581-1586.
- [8] 尚凤军, Abolhasan M, Wysocki T. 无线传感器网络的分布式能量有效非均匀成簇算法[J]. *通信学报*, 2009, 30(10): 34-43.
Shang F J, Abolhasan M, Wysocki T. Distributed energy efficient unequal clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(10): 34-43.
- [9] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [10] 许鹏飞, 苗启广, 李伟生, 等. 基于函数复杂度的自适应模拟退火和禁忌搜索新算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(8): 1811-1817.
Xu P F, Miao Q G, Li W S, et al. Adaptive simulated annealing algorithm and tabu search algorithm based on the function complexity[J]. *ACTA Electronica Sinica*, 2011, 39(8): 1811-1817.
- [11] 彭梅, 李传东, 何兴. 基于直接免疫的 SEIR 计算机病毒传播模型[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 30(1): 77-80.
Peng M, Li C D, He X. SEIR computer virus propagation model based on direct immunization[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2013, 30(1): 77-80.
- [12] 陈珊珊, 杨庚, 陈生寿. 基于 LEACH 协议的 Sybil 攻击入侵检测机制[J]. *通信学报*, 2011, 32(8): 143-149.
Chen S S, Yang G, Chen S S. LEACH protocol based security mechanism for Sybil attack detection[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(8): 143-149.

Research on the Cluster Header Selection Method of WSN Based on Immune Annealing

CHEN Zhi-jun¹, LI Ming²

(1. Yiwu Industrial & Commercial College, Yiwu Zhejiang 322000;

2. College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to mitigate the cluster header selection problem in wireless sensor network, a novel algorithm CHSIA (Cluster Head node Selection algorithm based on immune annealing) is proposed by immune annealing. In this algorithm, the optimization objective function is presented by the node energy consumption and remaining energy, and the optimal solution is solved with immune annealing method. Then, a simulation was conducted to study the key influence factors of CHSIA, such as network lifetime cycle, mutation probability, crossover probability, and so on. With 50% nodes become invalid in experiment, CHSIA can be extended to 162, while LEACH can only be extended to 119. The results show that CHSIA has better adaptability.

Key words: wireless sensor network; cluster header; remaining energy; immune annealing