

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.029

利用 sink 的流动性提高无线传感器网络寿命*

陈 喻,王飞宇,杨任尔*,袁 敏
(宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:为了解决在无线传感器网络中,由于部分传感器节点担任过多自身数据传输与数据中继转发任务,需要消耗较多的能量,使其过早死亡而缩短了网络的寿命等问题,将 sink 的移动技术应用到无线传感器网络中,开展了关于 sink 节点移动位置的分析,建立了当 sink 在某个特定位置时向 sink 传送数据的各个传感器节点之间的关系,提出了一个线性规划解决方案;在线性规划方案上对 sink 在各个位置的逗留时间进行了评价,并进行了模拟退火试验。试验结果表明,该方法在一定程度上均衡了传感器节点的负载,延长了网络寿命。

关键词:无线传感器;网络寿命;移动 sink;模拟退火;负载均衡

中图分类号:TN711.1; TP393.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2013)05-0636-05

Increasing lifetime of wireless sensor networks by sink's mobility

CHEN Yu, WANG Fei-yu, YANG Ren-er, YUAN Min

(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to solve the problems of parts of sensor nodes, which undertook a task for abundance data relay needing more energy so that it shortened the networks' lifetime and accelerated their death, the sink's mobility was investigated. After the analysis of locations of sink mobile nodes, the relationship among nodes about data transmission when sinks were in certain positions was established. A method about linear programming was presented to solve the problems. The sojourn time of all positions by using the simulated annealing algorithm was evaluated by the linear programming, the simulated annealing algorithm was tested. The experimental results show that it balances the load of nodes and lengthens the service lifetime of networks.

Key words: wireless sensor; lifetime of network; mobile sink; simulated annealing; balanced load

0 引 言

无线传感器网络(WSN)的应用已经越来越普及^[1-3],但仍然有很多问题需要解决。在一个使用静态 sink 节点的网络中,不同传感器节点的负载可能是高度分布不均的^[4-7]。在一个单跳网络中,远离 sink 节点的传感器节点将会消耗大量能量进行数据传递,导致电池迅速耗尽。在图中,一般这些节点用白色的圆圈表示;一个传感器节点拥有越多的能量,它的圈的颜色

越深。与之相反,在一个多跳网络中轮到 sink 节点的邻居迅速耗尽它们的电池,因为它们将会作为所有其他传感器节点数据包最后一跳的中继节点。当 sink 节点周围的普通节点都死亡时,其他节点就无法将数据送到 sink 节点上去,导致网络失效。

使用一个移动 sink 能够解决许多这种问题^[8-10]。如果 sink 节点不时地移动,不同传感器节点的负载将会改变,系统将会建立新的最短路径,选择新的最后一跳中继节点^[11-14],因此,传感器节点之间的负载分布

收稿日期:2012-11-02

基金项目:浙江省创新团队资助项目(2010R50009);浙江省重中之重学科资助项目(010-C01898124200);宁波市科技创新团队资助项目(2011B81002);宁波市服务型重点建设专业资助项目(sfwxzdzy200903)

作者简介:陈 喻(1991-),男,浙江宁波人,主要从事无线电通信方面的研究. E-mail:a88330130@sina.com

通信联系人:杨任尔,女,副教授. E-mail:yangrener@nbu.edu.cn

将会变得非常均衡。

本研究给出一个线性规划解决方案来决定 sink 的移动以及它在网络不同位置的逗留时间。首先,通过分析得出 sink 在某个特定位置时各个传感器节点向 sink 传送数据产生的能量消耗情况;然后,使用模拟退火优化算法求得 sink 在各个位置的旅居时间,以此来最大化网络寿命(这里网络寿命指的是到第一个传感器节点失效的时间)。

1 系统模型

首先,本研究假设整个传感器网络由 $n=L^2$ 个相同的传感器节点构成。传感器节点放到一个小的二维格点上,以一定的速率产生数据。sink 节点仅仅能够沿着网格点移动。

当一个传感器节点既不和 sink 在同一地点也不在 sink 的邻近格点上,那么系统沿着最短路径采用多跳传输将传感器节点的数据发送至 sink 节点。若同时存在多条最短路径的情况,此时由格点 i 和格点 k 确定了一个矩形,在路由协议中规定最短路径只考虑沿着该矩形的边缘的两条(路径①,②)如图 1 所示(路径①,②,③的长度都是4)。

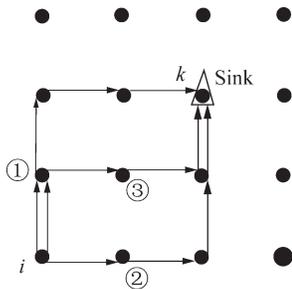


图1 传感器节点到 sink 节点的最短路径

在计算单个传感器节点的能量消耗的时候,笔者常采用“first order radio”模型。如果该传感器节点接收到的数据量为 k_1 (单位:bits/sec),则此时所需功耗为:

$$p_r = k_1\beta \tag{1}$$

式中: β —接收机接收一个比特所需的功耗。

传感器节点发送数据量为 k_2 (单位:bits/sec)时所需功耗为:

$$p_t = k_2(\alpha_1 + \alpha_2 d^p) \tag{2}$$

式中: α_1 —发射机发送一个比特所需的功耗; $\alpha_2 d^p$ —放大器的功耗,它随着物理传输距离 d 的增大而增大; p —信道衰减因子,通常为 2~4 之间。

因为传感器节点的传输有效距离非常有限,一般情况下收发机的功耗比放大器的功耗要大得多。为了方便讨论,本研究假定接收一个比特的能量跟发送一个比特的能量是相同的,把它们归一化为一个功耗

指数 e :

$$\beta \approx \alpha_1 + \alpha_2 d^p = e \tag{3}$$

因此每个传感器节点在某时刻上的功耗为(即与单位时间内发送接收数据量的总和成正比):

$$p_r + p_t = k_1\beta + k_2(\alpha_1 + \alpha_2 d^p) \approx e(k_1 + k_2) \tag{4}$$

在分析解决策略之前,本研究首先定义了要用到的各种变量:

- (1) e_0 : 每个传感器节点能量的初始值(单位:Joules);
- (2) e : 上节中引入的功耗指数,即收发一个比特所消耗的能量(单位:Joules);
- (3) r : 每个传感器节点自身产生数据包的速率(单位:bits/sec);
- (4) f_{ij}^k : 当 sink 在位置 k 逗留时,传感器节点 i 向节点 j 传输数据的速率(单位:bits/sec);
- (5) c_i^k : 当 sink 在位置 k 逗留时,传感器节点 i 的功耗(单位:Joules/sec);
- (6) S_i : 传感器节点 i 的邻域节点的集合;
- (7) t_k : sink 在位置 k 的旅居时间(单位:secs);
- (8) z : 网络寿命(单位:secs)。

当 sink 移动至 k 点的时候,位于 i 处的传感器节点的功耗为:

$$c_i^k = e(\sum_{j \in S_i} f_{ij}^k + \sum_{ji \in S_j} f_{ji}^k) \quad i, k \in N \text{ and } i \neq k \tag{5}$$

$$c_i^k = er \quad i, k \in N \text{ and } i = k \tag{6}$$

式(6)表明,当 sink 与传感器节点重合的时候,该传感器节点不需要作为其他传感器节点的中继节点,只需要传送自己本身产生的数据,所以此种情况下传感器节点消耗能量最少;而对于最靠近 sink 的 4 个节点而言,它们作为其他远处传感器节点到 sink 的最后一跳中继节点,承担了大量的中继任务,所以功耗相对而言较大。

考虑到每个传感器节点上的数据平衡,对于每个时间片段,传感器节点自身产生的数据量跟外部输入的数据量之和等于节点输出的数据量,则有:

$$\sum_{ji \in S_j} f_{ji}^k + r = \sum_{j \in S_i} f_{ij}^k \quad i, k \in N \tag{7}$$

基于上述对传感器节点功耗的分析,本研究采用线性规划模型来决定 sink 在每个位置的旅居时间 t_k , 以此来最大化网络寿命。笔者在此只关心 sink 的旅居时间,并不关心 sink 移动至各个点的顺序,因为假定 sink 在两点之间移动所花费的时间可以忽略不计。网络寿命的最大化,即让所有的旅居时间的总和最大化,如下式所示:

$$\text{Max } z = \sum_{k \in N} t_k \tag{8}$$

另外,在规划各点旅居时间时具有下式所示的约束条件:

$$\sum_{k \in N} c_i^k t_k \leq e_0 \quad i \in N \quad (9)$$

式中: $c_i^k t_k$ —sink 在 k 处逗留时传感器节点 i 总共消耗的能量。

在网络的生命周期内,传感器节点消耗的能量值不能超过它自身携带的初始能量值,即保证了传感器网络运行时没有一个传感器节点会在网络生命周期结束之前耗尽它的电池。

现在来讨论对于 c_i^k 的计算方法,本研究以举 5×5 的网格的为例来进行阐述。如图 2 所示,首先本研究建立了坐标系,三角形符号为 sink 当前所处的位置 k ,把整个网络分成 9 个子集,分别记为:UL(Upper Left),UR(Upper Right),LL(Lower Left),LR(Lower Right),VA(Vertical Above),VB(Vertical Below),HL(Horizontal Left),HR(Horizontal Right), k_0 。

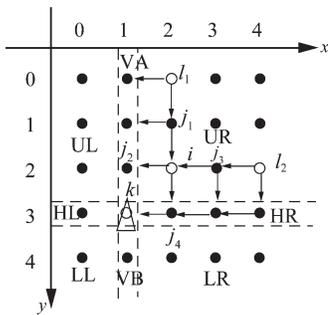


图 2 传感器节点 i 的数据传递情况

本研究讨论了位于 UR 上的节点 i 的功耗:它需要作为 l_1, l_2, j_1, j_3 节点的中继,所以单位时间接收数据量为 $2r$;因为节点 i 不属于 k 的邻域,它需要转发数据到 j_2, j_4 来进行多跳传输,加上它本身产生的数据,它在单位时间发送数据量为 $3r$ 。所以节点 i 单位时间内总共需要收发的数据量为 $5r$,功耗为:

$$c_i^k = 5re \quad (10)$$

按照该方法可以得到位于各个区域传感器节点的功耗表达式,即:

$$c_i^k = \begin{cases} er[(x+1)(1+L)-1] & i \in HL \\ er[(L-x)(1+L)-1] & i \in HR \\ er[(y+1)(1+L)-1] & i \in VA \\ er[(L-y)(1+L)-1] & i \in VB \\ er(1+x+y) & i \in UL \\ er(L-x+y) & i \in UR \\ er(L+x-y) & i \in LL \\ er(2L-x-y-1) & i \in LR \\ er & i \in k \end{cases} \quad (11)$$

2 解决策略

本研究考虑用模拟退火法来解决上节提出的优化问题。模拟退火算法是基于金属退火的原理而建立起来的一种全局最优化的方法,它能够以随机搜索的技术从概率的意义上找出目标函数的全局最小点。它是采取一种“平衡”的策略对空间进行搜索的,在搜索的时候不仅向“优化”方向搜索,还以一定的概率向“劣化”方向搜索,这样使得该算法能够跳出局部的极小区域,最终得到全局的最优解或者渐进的全局最优解。对于该优化算法的实现,模拟退火算法的运算复杂度较少,过程较为简单,并可较快逼近全局最优解,故在传感器网络的优化中较为可行。

此时的目标函数为:

$$\text{Max } z = \sum_{k \in N} t_k \quad (12)$$

即使所有的旅居时间之和最大化,其约束条件为:

$$\sum_{k \in N} c_i^k t_k \leq e_0, \quad i \in N \quad (13)$$

首先,本研究定义了模拟退火法要用到的各个参量:

- (1) Δz : 代价函数差;
- (2) T : 当前温度;
- (3) T_{end} : 终止温度;
- (4) α : 降温系数。

求解的模拟退火算法描述如下:

(1) 初始化,使用 Monte Carlo 方法求得一个符合约束条件的较好的初始解,如:

$$\{t_k, k \in N\} \quad (14)$$

(2) 产生新解,任选节点序号 u, v ,更新 t_u 与 t_v ,如:

$$\begin{cases} t'_u = t_u - \Delta_1 \\ t'_v = t_v + \Delta_2 \end{cases} \quad (15)$$

同时使之满足式(13)的约束条件。

(3) 得到代价函数差为:

$$\Delta z = \Delta_2 - \Delta_1 \quad (16)$$

(4) 设定接受准则为:

$$P = \begin{cases} 1 & \Delta z > 0 \\ \exp(\Delta z/T) & \Delta z \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

如果 $\Delta z > 0$,则接受新解。否则,以概率 $\exp(\Delta z/T)$ 接受新的路径,即若 $\exp(\Delta z/T)$ 大于 0~1 之间的随机数则接受。

(5) 利用选定的降温系数 α 进行降温,即: $T \leftarrow \alpha T$,得到新的温度,这里取 $\alpha = 0.999$ 。

(6) 用选定的终止温度 T_{end} ,判断退火过程是否结束。若 $T < T_{\text{end}}$,算法结束,输出当前状态。

3 实验结果

当sink为静态的时候,网络的寿命为:

$$z_s = \max_k \left\{ \min_i \frac{e_0}{c_i} \right\}, \quad (i, k \in N) \quad (18)$$

本研究利用给出的静态 sink 模型和移动 sink 模型,并设 $r=1 \text{ bit/sec}$, $e=0.62 \mu\text{J/bit}$, $e_0=1.35 \text{ J}$ 。可以得到仿真结果如图3、图4所示。

从图3中可以看到,随着传感器节点数量的增加,网络的寿命随之减少,且使用静态的 sink 时网络寿命比使用移动 sink 时衰减得更加迅速。

从图4中可以看到,总体上随着传感器节点数的增加,使用移动 sink 带来的网络寿命的增益不断增大,但是偶数个传感器节点的情况要明显优于奇数个节点的情况,这是由于若传感器节点为偶数个(比如 8×8),网络的中心节点有4个, sink 在中心区域逗留时候可以在这4个节点之中游走,但是如果传感器节点的数量为奇数个, sink 在中心区域逗留的时候只能位于唯一的中心节点,所以前者更容易做到负载均衡,提高网络寿命的增益。

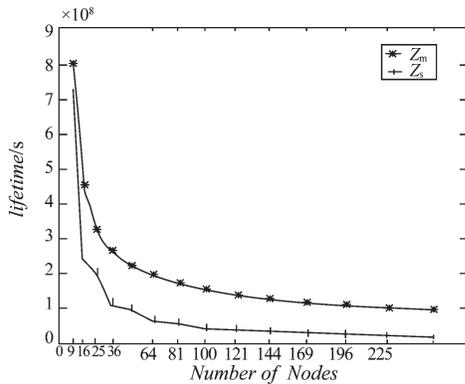


图3 使用移动 sink 与静态 sink 时网络寿命对比

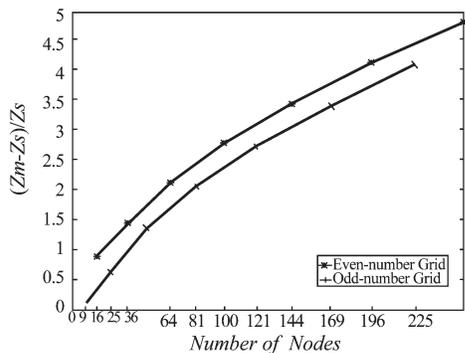


图4 使用移动 sink 时的网络寿命增益

为了不失一般性,本研究讨论传感器网络为 8×8 的情况。由上面的线性规划解决方案可以得到, sink 在各个点的最佳旅居时间如表1所示。这个结果非

表1 8×8 网络中 sink 在各点的逗留时间

| $x \backslash y$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1 | 18 217 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 966 | 10 252 |
| 2 | 0 | 10 362 | 1 572 | 0 | 0 | 1 572 | 2 396 | 7 966 |
| 3 | 0 | 1 572 | 6 184 | 4 851 | 4 851 | 6 184 | 1 572 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 4 851 | 673 | 673 | 4 851 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 4 851 | 673 | 673 | 4 851 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 572 | 6 184 | 4 851 | 4 851 | 6 184 | 1 572 | 0 |
| 7 | 7 966 | 2 396 | 1 572 | 0 | 0 | 1 572 | 10 362 | 0 |
| 8 | 10 252 | 7 966 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 217 |

注: x, y 表示节点的横坐标与纵坐标与实际应用中的距离位置成正比(表2,表3也是一致)

常有趣,因为它显示 sink 节点应该花费大部分时间在网络的4个角落和中间区域。本研究将 sink 节点放到网络的中心位置,降低了从传感器节点到 sink 的平均路径长度;然而,中间区域的传感器节点将会比靠近角落的传感器节点承担更多的转发任务。因此, sink 节点也应该移动到网络的4个角落并且长时间逗留来充分利用那些位于角落的传感器节点剩余的大量能量。

在移动 sink 的情况下,本研究根据上述的旅居时间,在网络寿命终结的时候测得各个传感器节点的能量值如表2所示。可以看到,除了网络的4个角落上的节点还保存有较多的能量,其他节点均在网络寿命终结之时耗尽它们的电池,可见此时网络的负载非常之均衡。

笔者注意到,位于角落的传感器节点的剩余能量不能够得到最大化利用:当 sink 节点移动到位于角落的节点上,所有数据传输中继任务将会由其邻域节点承担,与 sink 在同一地点的传感器节点不需要承担任何的中继任务。另一方面,当与 sink 距离变远时,位于角落的传感器节点仅需要传送自己本身的数据,亦不需要承担任何中继任务。

表2 移动 sink 网络寿命终结时各节点的剩余能量(移动 sink 时)

| $x \backslash y$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1.072 | 0.118 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.424 | 1.003 |
| 2 | 0.118 | 0.543 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.424 |
| 3 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 |
| 4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 6 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 |
| 7 | 0.424 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.543 | 0.118 |
| 8 | 1.003 | 0.424 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.118 | 1.072 |

静态 sink 网络寿命终结时的各节点的剩余能量如表3所示。本研究把静态 sink 置于黑框所处的位

置,然后到网络寿命终结的时候,测各个节点的能量值。可以看到,离 sink 越近的4个节点消耗能量非常迅速,当其中2个节点的电池耗尽的时候,其他节点还保存有 26%~97% 的能量。此时网络的负载非常不均衡,尤其是当传感器节点非常多的时候,这种不均衡的情况越发明显。在传感器节点数量为256的情况下,移动 sink 相对于静态 sink 的网络寿命增益达到了将近 500%。

表3 静态 sink 网络寿命终结时各节点的剩余能量(移动 sink 时)

| $\begin{matrix} y \\ x \end{matrix}$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1.31 | 1.27 | 1.23 | 1.04 | 1.20 | 1.23 | 1.27 | 1.31 |
| 2 | 1.27 | 1.23 | 1.20 | 0.69 | 1.16 | 1.20 | 1.23 | 1.27 |
| 3 | 1.23 | 1.20 | 1.16 | 0.35 | 1.12 | 1.16 | 1.20 | 1.23 |
| 4 | 1.04 | 0.69 | 0.35 | 1.31 | 0.00 | 0.35 | 0.69 | 1.04 |
| 5 | 1.20 | 1.16 | 1.12 | 0.00 | 1.08 | 1.12 | 1.16 | 1.20 |
| 6 | 1.23 | 1.20 | 1.16 | 0.35 | 1.12 | 1.16 | 1.20 | 1.23 |
| 7 | 1.27 | 1.23 | 1.20 | 0.69 | 1.16 | 1.20 | 1.23 | 1.27 |
| 8 | 1.31 | 1.27 | 1.23 | 1.04 | 1.20 | 1.23 | 1.27 | 1.31 |

4 结束语

在无线传感器网络中,由于部分传感器节点担任过多自身数据传输与数据中继转发任务,需要消耗较多的能量,使其过早死亡,缩短了网络的寿命等原因。本研究利用 sink 节点的移动性,通过一个线性规划模型,应用模拟退火算法,可在最大程度上提高无线传感器网络寿命。

与静态 sink 相比,无线传感器网络寿命提高了将近 500%。通过对各个无线传感器网络传感器节点能量的分析更加明确地体现了移动 sink 节点的优势性。

在未来的研究中,笔者会考虑更加复杂的环境,并且引入更多实际的因素,如利用随机的数据产生速率、多个 sink 之间的协调移动、随机的无线传感器网络拓扑结构、传感器的数据可靠性以及外界因素的攻击等等。另外,移动 sink 对整个传感器网络的影响,如频带利用率及无线传感器网络的均衡性,无线传感器网络的处理能力、存储能力、通信能力等等,也需要进一步研究。

参考文献(References):

- [1] WANG Z M, BASAGNI S, MELACHRINOUDIS E. Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime [C]. Proceedings of 38th Hawaii International Conference on System Sciences Big Island:[s.n.],2005.
- [2] AL-KARAKI J N, KAMAL A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey [J]. *IEEE Wireless Communications*,2004,11(6): 6-28.
- [3] SOHRABI K, GAO J, AILAWADHI V. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. *IEEE Wireless Communications*,2000,7(5):16-27.
- [4] 刘 强,毛玉明,冷甦鹏. 无线传感器网络中多 sink 节点优化部署方法 [J]. *计算机应用*,2011,31(9): 2313-2316.
- [5] 王 勇,王万良,一种基于移动 sink 的无线传感器网络路由算法 [J]. *机电工程*,2010,27(2):17-20.
- [6] 谢 政,李建平,陈 挚. 非线性最优化理论与方法 [M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [7] 焦伟伟. 基于一定 sink 节点的无线传感器网络中若干关键问题研究[D]. 北京:北京邮电大学网络技术研究院,2010.
- [8] 向 阳,龚新高. 推广模拟退火方法及其应用[J]. *物理学进展*,2000,20(3):319-334.
- [9] 张 扬,杨松涛,张香芝. 一种模拟退火遗传算法的传感器网络数据融合技术研究[J]. *计算机应用研究*,2012,29(5):1860-1866.
- [10] 孙 超,赵路路,张 影,等. 无线传感器网络分簇拓扑的覆盖区域节点调度优化算法研究 [J]. *传感技术学报*,2010,23(1):116-121.
- [11] 诸燕平,黄大庆. 基于线性规划的无线传感器网络定位算法 [J]. *华中科技大学学报:自然科学版*,2009,37(12):29-32.
- [12] 郭 剑,孙力娟,王汝传,等. 面向无线多媒体传感器网络的移 Sink 路径规划[J]. *计算机研究与发展*,2010,47(Z2):184-188.
- [13] 张 蕾,张 堃,宋 军. 无线传感器网络中一种基于移动 Sink 的数据收集算法[J]. *传感技术学报*,2012,25(5):673-677.
- [14] 王晓丽. 基于遗传模拟退火算法的无线传感器网络定位算法的研究[D]. 武汉:武汉理工大学计算机科学与技术学院,2011.

[编辑:李 辉]