

基于负载均衡的无线传感器网络路由算法^①

周志立

(浙江工贸职业技术学院 电子系, 温州 325003)

摘要: 延长网络的稳定周期是无线传感器网络路由算法的重要挑战, 负载均衡算法是解决上述问题的重要方法之一. 提出了一种负载均衡算法(LDBRA), 它根据节点的能量分布状况及通信能耗选择簇首节点以实现负载均衡. 在簇首选择过程中, 在以上两个因素中选择平衡点实现最优簇头的选择. 仿真结果显示 LDBRA 能够更好地实现负载均衡, 延长网络的稳定周期.

关键词: 无线传感器网络; 负载均衡; 能量; 通信能耗

Wireless Sensor Networks Routing Algorithm Based on Load Balance

ZHOU Zhi-Li

(Department of Electron, Zhejiang Industry and Trade Vocational College, Wenzhou 325003, China)

Abstract: It is a challenge to prolong the stable period in wireless sensor networks. Load balance routing algorithm is one of the solutions to the problem. The paper proposed a load balance routing algorithm(LDBRA), which select cluster head nodes and implement load balance according to the condition of energy distributing and the communication cost to prolong the network lifetime stable period. In the process of cluster head selecting, based on the above two factors to select optimal cluster head nodes. Simulation results show that the LDBRA could better implement load balance and prolong the network stable period.

Key words: wireless sensor networks; load balance; energy; communication cost

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量体积小、成本低且具有传感、数据处理和无线通信能力的传感器节点组成. 随着无线通信、微机电系统和传感器等硬件技术的发展的不断进步,它的重要性日益突出,并且在医疗、军事、环境检测、工业等领域有着广泛的应用前景. 但由于无线传感器网络的节点采用微型电池供电,系统的能量资源非常有限,且放置在恶劣的环境中工作,一般很难进行充电或是替代. 因此,研究和设计能量有效性的通信路由协议,延长网络稳定时间是无线传感器网络技术迫切需要解决的问题.

为了有效地减少网络的能量消耗,延长网络的生存时间,研究人员提出了多种传感器网络的分簇路由协议. LEACH^[1]是最早提出的分簇路由协议之一,它

的基本思想是通过等概率的随机循环选择簇首,将整个网络负载平均分配到每个传感器节点中,从而达到降低网络能量消耗、延长网络生命周期的目的. 但它没有充分考虑节点的剩余能量及通信能耗,存在负载均衡不均、节点传输能耗大、网络生存时间短等缺陷,文献[2]在此基础上进行了改进,但仍未改变以上的缺点. HEED^[3]在选举簇首时考虑了节点的剩余能量,在有限次簇内消息迭代后完成簇首的产生,并以主从关系引入了多个约束条件作用于簇首的选择,这样就增加了协议的复杂度及通信能量消耗. DCHS^[4]在成簇过程中虽然也考虑了能量因素,但只利用了节点的当前能量和初能量的比例来影响阈值,从而使能量比例消耗低的节点优当选簇头,仍然没有很好地解决网络负载的均衡性问题.

^① 收稿时间:2012-06-16;收到修改稿时间:2012-07-11

本文提出了一种负载均衡算法(Load Balance Routing Algorithm, LDBRA),它根据节点的能量分布状况及通信节点间能耗选择簇首节点以实现负载均衡.在簇首选择过程中,在以上两个因素中选择平衡点以实现最优簇首的选择.仿真结果显示 LDBRA 能够更好的实现负载均衡,延长网络的稳定时间.

1 网络模型及其问题描述

1.1 网络模型

假定在 $M \times M$ 的区域随机分布了 N 个传感器节点,并假设如下条件;

- ①所有节点具有相同的计算、存储、通信等能力,且节点部署后不再移动;
- ②节点可以通过调节发射功率来调节通信范围;
- ③基站是唯一的,远离探测区域,并且无线发射功率可控;
- ④节点通信链路对称,且可根据接收信号的强度计算发送节点间的相对距离;

本文采用与文献[5]相同的能量模型.在发送 k bit 数据经过距离 d 的过程中,发送端能量消耗为:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx_elec}(k) + E_{Tx_amp}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收端能量消耗为:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx_elec}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发送或接收 1bit 数据时的电路能量消耗, $\varepsilon_{fs}d^2$ 和 $\varepsilon_{mp}d^4$ 是发送 1bit 数据放大器的能量消耗, d_0 为距离门限,当传输距离小于该门限时采用自由空间信道模型,反之,采用多径衰落信道模型.

1.2 问题描述

具有较大的稳定周期的传感器网络能够更准确地获取被观测环境的信息,因此,它对于许多需要可靠反馈信息的传感器网络至关重要.本质上,延长传感器网络稳定时间的方法都是在最小化系统每轮能量消耗的同时,把能量损耗均衡地分布在各个节点上.所以,对于分簇协议,簇的形成将决定每轮系统能量地损耗状况.为了减少系统每轮中能量损耗并实现负载均衡,协议应该重点考虑如下问题:

① 为了减少系统每轮中能量损耗,簇首和成员节点之间的通信能量损耗应该满足自由空间模型,既在成簇阶段要保证簇内节点与簇首的距离小于式(1)中的 d_0 .

② 簇首的选择必须充分考虑到节点的剩余能量状况,剩余能量多的节点应该具有更高的概率成为簇首.

③ 簇首的选择除考虑剩余能量外,还必须考虑簇首与节点间的通信能耗,通信能耗小的节点应优先成为簇首.

为了更好地描述问题,作如下定义:

定义 1. 网络的稳定周期: 为从传感器网络启动到第一个节点能量耗尽的时间.

定义 2. 探测区域: 以任意节点为中心,探测距离 R 为半径的圆形范围.

2 LDBRA算法

文献[1]中,将时间划分为轮,每轮分为成簇阶段和稳定阶段,为了减少能量消耗和保持网络相对稳定,稳定阶段的持续时间应远大于成簇阶段的持续时间.在成簇阶段,每个传感器节点分布式地选择 $0 \sim 1$ 之间的一个随机数,如果该随机数小于阈值 $T_{(n)}$,则这个节点成为簇首, $T_{(n)}$ 的计算如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times [r \bmod (1/p)]} & n \in G \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, p 是节点成为簇首的概率, r 是目前已完成的轮数, G 是在最近 $1/p$ 轮中还没有被选为簇首的节点集合.

结合文献[6]思想,当网络中的节点的初始能量不相同,或初始能量相同但在网络工作过程中能量消耗不均衡,都会产生能量异构.此时,选择簇首节点需要考虑节点的剩余能量以实现网络的负载均衡.本文使用探测区域内当前节点 i 剩余能量与初始能量的比值的负指数来衡量节点的当前节点能量消耗状况:

$$EC_i = \exp\left(-\frac{E_{residual}(i)}{E_0}\right) \quad (4)$$

式(4)中, $E_{residual}(i)$ 表示节点 i 的当前剩余能量, E_0 表示节点 i 的初始能量,如果 $E_{residual}(i)$ 越大, EC_i 就越小,节点 i 当选簇首的概率就越高,由于 $E_{residual}(i) \leq E_0$,所以 $EC_i \in [0, 1]$.

传感器网络中由于不同节点通信能耗的不同也会造成网络能量异构,而且选择不同的簇首,簇内的总通信能耗也不同,所以负载均衡算法应把传感器网络的节点间通信能耗考虑进来.假设以簇首*i*为中心的探测区域内有*n*+1个节点,根据文献(1)的能量参考模型,可计算出探测区域的总能耗:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{total}} &= E_{CH} + \sum_{j=1}^n E_{\text{non_CH}} \\
 &= nE_{Rx}(l) + E_{Tx}(l, d_{i,BS}) + nE_{\text{fusion}}(l) + \sum_{j=1}^n E_{Tx}(l, d_{i,j}) \\
 &= (2n+1)lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{mp} d_{i,BS}^4 + nE_{\text{fusion}}(l) + l\epsilon_{fs} \sum_{j=1}^n d_{i,j}^2
 \end{aligned} \tag{5}$$

由式(5)可知, E_{total} 取决于 $d_{i,BS}^4$ 与 $\sum_{j=1}^n d_{i,j}^2$ 其中, $d_{i,BS}$ 为簇首节点*i*到基站的距离, $\sum_{j=1}^n d_{i,j}^2$ 为簇首节点*i*到簇内任意节点*j*的距离.由于网络模型中假设基站远离探测区,故 $d_{i,BS}$ 可看作常数,故 E_{total} 与 $\sum_{j=1}^n d_{i,j}^2$ 成正比,所以可用 $\sum_{j=1}^n d_{i,j}^2$ 来衡量 E_{total} , 由于不同簇的节点数*n*不同,所以可用式(6)的 ACE_i 中来衡量 E_{total} :

$$ACE_i = \begin{cases} \frac{\sum_{j \in NBR_i} d_{i,j}^2}{|NBR_i| R^2} & |NBR_i| > 0 \\ 0 & |NBR_i| = 0 \end{cases} \tag{6}$$

其中, NBR_i 为探测区节点的集合, R 为探测半径,若 $\sum_{j \in NBR_i} d_{i,j}^2$ 越小,说明通信能耗越小, ACE_i 数值就越小,节点*i*当选簇首的概率就越高.由于 $d_{i,j} \leq R$,所以 $ACE_i \in [0, 1]$.

对于节点间的距离的计算可参考文献[7],假设节点*i*以能量为发送信息,节点*j*接收到此信息的能量强度为,则有:

$$E_t^i = E_r^j d_{i,j}^n / K \tag{7}$$

其中, K 为常数, n 为衰减指数,通常取 4. 根据式(7)可得出节点*i, j*间的距离:

$$d_{i,j} = \sqrt[n]{\frac{E_t^i \times K}{E_r^j}} \tag{8}$$

综合考虑式(4)(6)构建簇首选择因子:

$$\begin{aligned}
 PER &= EC_i^\beta \times ACE_i \\
 &= \exp\left(-\beta \frac{E_{\text{residual}}(i)}{E_0}\right) \times \frac{\sum_{j \in NBR_i} d_{i,j}^2}{|NBR_i| R^2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中, β 为平衡因子,其值越大, EC_i 对 PER 影响力越大,反之, ACE_i 对 PER 影响力越大,不同 β 值对 PER 的影响待以后进一步分析,本文中取 $\beta=1$.

由(9)式对节点产生的 0~1 的随机数作调整:

$$rand(i) = rand_{\text{temp}}(i) \times PER \tag{10}$$

其中, $rand_{\text{temp}}(i)$ 是节点生成的 0~1 随机数, $rand(i)$ 是节点与阈值 $T(n)$ 比较的最终随机数.

3 仿真及结果分析

为了评估 LDBRA 算法的性能,采用 ns2.28 对 LEACH 与本算法进行模拟.实验中,100 个节点随机分布在一个 100m×100m 的正方形区域内,忽略由信号碰撞和无线信道干扰等随机因素带来的影响,仿真场景参数设置如表 1 所示.

表 1 实验参数

参数	取值
网络覆盖区域	(0, 0) ~ (100, 100)
基站位置	(250,100)
节点初始能量	2J
E_{elect}	50nJ/bit
ϵ_{fs}	10pJ/(bit·m ²)
ϵ_{mp}	0.0013pJ/(bit·m ⁴)
E_{fusion}	5nJ/(bit·singal)
阈值 d_0	87m
数据包大小	1000bits
广播包大小	20bits
节点探测半径	30m

图 1 描述了生存节点数量随时间的变化情况.由图可看出, LDBRA 相比 LEACH 具有更长的稳定周期,从图中还可以看出 LDBRA 在第一个节点死亡后,节点的死亡速度迅速增加,这表明 LDBRA 具有较快的收敛性.图 2 描述了网络节点总能量消耗与时间的关系,由图可知,在稳定周期内 LDBRA 总能耗低于 LEACH,在第一个节点死亡后,节点总能量消耗迅速增加,这个特性很好地解释了图 1 中节点死亡率具有较快收敛这一特点,这是由于 LDBRA 在簇首选择时考虑了节点的剩余能量以及簇内节点间的通信能耗,使得网络能耗更小,负载能耗更加均衡.

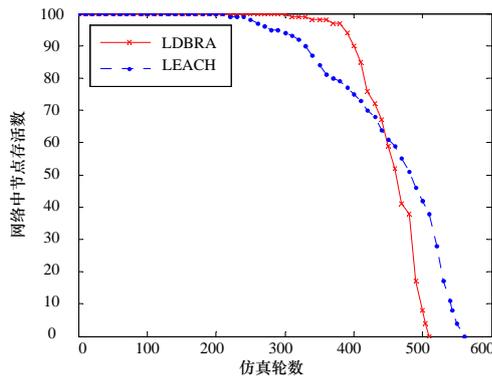


图 1 网络存活节点数目随时间变化

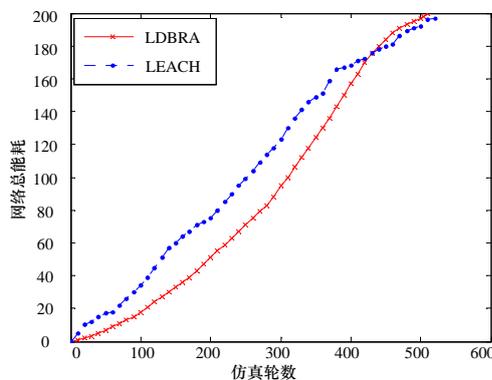


图 2 网络总能耗随时间变化

4 结语

为了使无线传感器网络负载更加均衡, 本文提出了 LDBRA 负载均衡算法, 它充分考虑了节点剩余能量分布以及簇内节点间的通信能耗来选择簇首, 用节点间的通信距离的平方来衡量节点间的通信能耗, 在剩余能量与通信能耗间取平衡点来优化簇首的选择. 下一步的研究方向将是考察平衡因子的选择对不同网络性能的影响.

(上接第 46 页)

- 4 Hyuntae C, Hyunsung J, Yunju B. Practical localization system for consumer devices using Zigbee networks. *Consumer Electronics*, 2010,56(3):1562-1569.
- 5 宁炳武, 刘军民. 基于 CC2430 的 Zigbee 网络节点设计. *电子技术应用*, 2008,34(3):95-99.
- 6 唐炜, 郑小林, 干红华, 等. 基于运动估计的 ZigBee 无线网络

参考文献

- 1 Heizelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient Routing Protocols for Wireless Microsensor Networks. *Proc. of the 33rd Hawaii International Conferences on System Sciences*. Hawaii, USA: IEEE Press, 2000: 3005-3014.
- 2 Song CY, Huazhong Z, Xiuyang Z. Clustering hierarchy tree routing algorithm based on LEACH. *Journal of Computer Applications*, 2008,28(10):2594-2596.
- 3 Younis O, Fahmy S. A Hybrid, Energy Efficient. Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2004,3(4):660-669.
- 4 Handy MJ, Haase M, Timmermann D. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-head Selection. *Proc of the 4th IEEE Conf on Mobile and Wireless Communications Networks*. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 368-372.
- 5 Heizelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Trans. Wireless Communication*, 2002,1(4): 660-670.
- 6 Chamam A, Pierre S. A Distributed Energy-Efficient Cluster Formation Protocol for Wireless Sensor Networks. *Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2009*. 6th IEEE, 2009,1(10):1-5.
- 7 Doshi S, Bhandare S, Brown T. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless Ad Hoc network. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2002,6(3):50-66.
- 定位方法. *计算机工程*, 2010,36(20):256-258.
- 7 Wang DH, Jia HD, Chen FX, et al. An improved DV-Distance localization algorithm for wireless sensor networks. *ICACC*, 2010,5:472-476.
- 8 章伟聪, 俞新武, 李忠诚. 基于 CC2340 及 ZigBee 协议栈设计无线网络传感器节点. *计算机系统应用*, 2011,20(7):184-187.