

基于分簇的无线传感器网络多跳路由算法

李 涵 吴秋新 王小妮
(北京信息科技大学理学院 北京 100192)

摘 要 由于无线传感器网络中节点能量有限,而且不易补充,因此节能是其研究的主要技术之一。为平衡网络节点能耗负载,延长网络寿命,考虑到随机分布节点的剩余能量和节点相对于基站的位置,提出了一种基于分簇的多跳路由算法。算法中,引入了能量控制因子来降低低能量节点被选为簇首的概率;利用簇首权重的影响,建立基于最短距离的多跳路由,解决了不同距离的簇首之间的能耗平衡问题。仿真实验表明,所提算法能够更好地均衡网络负载,延长网络的生存时间。

关键词 无线传感器网络,多跳,路由,分簇,能量均衡

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Multi-hop Routing Algorithm Based on Clustering in WSN

LI Han WU Qiu-xin WANG Xiao-ni

(School of Applied Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract Wireless sensor networks (WSN) pose new research challenges related to the design of algorithms, network protocols, and software that will enable the development of applications based on sensor devices. In this paper, we proposed a multi-hop routing algorithm based on clustering to reduce the energy consumption and prolong network lifetime. In order to avoid nodes with low residual energy becoming cluster heads, our algorithm selects residual energy as an energy-control factor to balance the energy consumption. Through the introduction of Cluster Head-weight, multi-hop Cluster Head routing trees with shortest path are constructed. Through the multi-hop transmission way, it reduces the number of Cluster Heads to connect directly with Base Station in communication. Simulation results show our algorithm is more efficient to reduce and balance energy consumption and hence prolong the lifetime of WSN.

Keywords Wireless sensor network, Multi-hop, Routing, Cluster, Energy balance

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由分布在被监测区域内的大量廉价的传感器节点以自组织的形式构成的网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内被监测对象的信息,并发送给远端的基站[1]。由于网络节点能量有限,而且不易补充,因此节能是 WSN 研究的主要技术之一。为平衡网络节点能耗负载,延长网络寿命,Wendi Rabiner 等人提出一种低功耗自适应集簇分层型协议——LEACH 协议[2]。LEACH 基于无线传感器节点均匀分布,并没有考虑节点的剩余能量,因 WSN 中节点是随机分布的,故在实际应用中效果不好。而 ESAC 和 LUCA 算法[3]虽然考虑了节点的非均匀分布和剩余能量,但由于没有考虑分簇与基站的距离,仅以节点的剩余能量和分布密度为依据,导致靠近基站的分簇节点能量消耗较快,使得网络负载不均衡[4]。本文在研究前人工作的基础上,提出一种基于分簇的多跳路由算法,通过引入能量控制因子、簇首权重等概念,建立了分布和能耗均衡的分簇,均衡了网络负载,延长了网络生存周期。

2 系统模型

2.1 能量模型

本文采用了 LEACH 提出的能量模型。假设发送端能耗包括信号处理与功率放大两部分,接收端能耗仅用于信号处理。根据无线通信理论,两个距离为 d 的传感器节点之间发送和接受 L bit 数据时,发送端消耗的能量[5]为:

$$E_{Tx}(L, d) = \begin{cases} L * E_{dec} + L * \epsilon_{fs} * d^2, & \text{if } d < d_0 \\ L * E_{dec} + L * \epsilon_{mp} * d^4, & \text{if } d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{dec} 是电路发射、接收 1bit 数据所消耗的能量, d 是发送和接收节点之间的通信距离。当两个节点间的距离小于 d_0 时采用自由空间路径损耗模型,当两个节点间距离大于等于 d_0 时采用多径衰落模型。 ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别为两种模型功率放大所需的能量。

接收端所消耗的能量为:

$$E_{Rx}(L) = L * E_{dec} \quad (2)$$

2.2 前提假设

假设无线传感器网络中随机分散着 n 个节点,它们具备

本文受北京市教委面上项目(KM201110772018)资助。

李 涵(1978—),女,硕士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络、网络安全, E-mail: annelh@126.com; 吴秋新(1967—),男,博士,副教授,主要研究领域为信息安全、无线传感器网络; 王小妮(1977—),女,博士,讲师,主要研究领域为物联网应用。

如下特点:

- (1) 传感器节点在网络中一旦部署便不再移动;
- (2) 所有节点具有相同的初始能量;
- (3) 基站位于无线传感器网络检测区域外部,且基站的能量足够大;
- (4) 所有节点是同构的;
- (5) 所有节点具有足够的能量完成数据通信和路由组建。

3 基于分簇的多跳路由算法

与 LEACH 相同,算法的执行过程是周期性的,每轮循环包括簇的组建阶段和稳定工作阶段。在簇的组建阶段,节点自组织形成簇,产生簇首;在稳定工作阶段,簇内成员节点把数据发送给簇首,簇首进行数据融合后把结果发送给基站。

3.1 成簇阶段

在 LEACH 中,簇首节点是随机产生的。这种随机选取簇首的方法虽然使网络中各节点有相同的机会担任簇首,在一定程度上保证了网络能量的均衡消耗,但很容易使网络由于簇首节点能量消耗过快而提前死亡^[5,6]。本文中选取节点的剩余能量作为能量控制因子来均衡无线传感器网络中的能量消耗。首先,每个节点产生一个介于 0 和 1 之间的随机数,如果这个数小于某个阈值 $T(n)$,则该节点有可能成为簇首。在本文的算法中,利用节点的剩余能量与初始能量的比值作为能量控制因子去调整阈值 $T(n)$ 的取值,使具有较高剩余能量的节点被选为簇首的可能性提高。阈值 $T(n)$ 的计算方法如下:

$$T(n) = \frac{p}{1 - p(r \times \text{mod } \frac{1}{p})} \times [r_m p + (1 - r_m p) \frac{E_{i-\text{residual}}}{E_{i-\text{init}}}] \quad (3)$$

这里 p 为结点被选为簇首的概率, r 是当前循环进行的轮数, r_m 是结点没有被选为簇首的轮数, $E_{i-\text{init}}$ 是结点 i 的初始能量, $E_{i-\text{residual}}$ 是结点 i 当前的剩余能量。在某一轮中,如果结点 i 被选为簇首,则置 $r_m = 0$,否则 $r_m + 1$ 。

在选择簇首阶段,能量控制因子 $E_{i-\text{residual}}/E_{i-\text{init}}$ 的引入,降低了结点被选为簇首的随机性。通过式(3)可以看出,具有较高剩余能量的结点比剩余能量较少的结点更有可能被选为簇首。这种选取簇首的方法可以有效地避免结点能量过早地耗尽,从而均衡整个无线传感器网络的能量消耗。

假设无线传感器网络中的 n 个节点随机分布在 $S = M \times M$ 的方形区域中,在自由空间路径损耗模型下,一轮中簇首消耗的能量^[7]可以通过式(4)计算得出:

$$E_{CH} = (\frac{n}{k} - 1) * L * E_{dec} + \frac{n}{k} * L * E_{DA} + L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * d_{BS}^2 \quad (4)$$

其中, k 是网络中簇的个数, E_{DA} 是传输 1bit 数据给基站的能量消耗, d_{BS} 是各个簇首与基站间的平均距离。

非簇首节点的能量消耗可以计算如下:

$$E_{nonCH} = L * E_{dec} + L * \epsilon_{fs} * d_{CH}^2 \quad (5)$$

这里 d_{CH} 是簇内各成员节点与本簇的簇首之间的平均距离。

可以计算出在一轮中整个网络的能量耗费:

$$E_{total} = L * (2 * n * E_{dec} + n * E_{DA} + \epsilon_{fs} * (k * d_{BS}^2 + n * d_{CH}^2)) \quad (6)$$

由此可以计算出网络中簇的个数为:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \frac{M}{d_{BS}^2} \quad (7)$$

成为簇首的节点向网络中发送广播消息,非簇首节点收到广播消息后,根据接收到的信号强弱,选择收到信号强度最强的作为自己的簇首,并向该簇首发送入簇请求。当簇首确认节点的入簇请求后,建立簇内的 TDMA 传输时间安排,并将该传输时间安排发送给自己簇内的成员。以此保证簇内通信时不会发生数据的传输碰撞,并且允许簇内成员节点在自己的非发送时间内关闭自己的电台,从而降低节点的能量消耗。之后,簇首向外广播路由消息,其中包含簇首的标识符 ID、簇首的剩余能量、与基站的距离等信息。这样,每个簇首节点都能够得到其邻居簇首的路由信息,至此完成簇的组建。

这种成簇的算法,有效控制了簇首的数量,使网络不会因簇首数目过多,造成过多的节点与基站通信,降低网络能量的利用率,影响网络的寿命和稳定性。另外,能量控制因子的引入,有效地防止了低能量的节点成为簇首,避免了因为簇首死亡造成的数据丢失和产生网络空洞,使网络能量得到均衡利用,显著地延长了网络的寿命。

3.2 簇间多跳路由算法

LEACH 中簇首与基站之间采用的是单跳通信,这样距离基站较远的簇首会过早死亡^[7]。因此本文采取簇间多跳通信的方式。但在多跳通信中,距离基站较近的簇首因需要转发大量的数据而成为“热点”,这样会使簇首过早失效。为解决不同距离的簇首之间的能耗平衡,本文利用节点间的最短路径算法^[8]构造簇间多跳路由,平衡簇首间的距离和能耗关系,降低网络能耗。

首先,簇首节点和基站根据接收到的广播消息,计算簇首权重 $\omega(CH_i)$ 。

$$\omega(CH_i) = \frac{d_{CH_i-BS}}{\max d_{CH-BS}} + 1 - \frac{E_{CH_i-\text{residual}}}{\max E_{CH-\text{residual}}} \quad (8)$$

其中, d_{CH_i-BS} 是簇首 i 与基站的距离, $\max d_{CH-BS}$ 是各个簇首与基站间的最大距离, $E_{CH_i-\text{residual}}$ 是簇首 i 的剩余能量, $\max E_{CH-\text{residual}}$ 是各个簇首剩余能量的最大值。由式(8)可以看出,距离基站越近、剩余能量越多的簇首,其簇首权重 $\omega(CH_i)$ 就越小。因此,基站首先根据簇首权重,选取若干个具有最小权重值的簇首作为直接通信簇首。然后,以这几个直接通信簇首为出发点,利用 Dijkstra 算法,求出到达其他簇首的最短路径。

在求最短路径时,网络中各簇首间的距离权值计算如下:

$$p_{S \rightarrow D} = E_{S \rightarrow D} * \frac{n_S}{n} \quad (9)$$

这里, $p_{S \rightarrow D}$ 为簇首 S 到簇首 D 的权值, $E_{S \rightarrow D}$ 为簇首 S 发送数据到簇首 D 的能耗, n_S 是簇首 S 所在簇内节点的个数, n 是各簇平均节点数。由式(9)可以看出,簇首 S 所在簇内节点数目越多,簇首 S 在簇内通信时的能耗就越大,则 $p_{S \rightarrow D}$ 值就越大;同样,若 $E_{S \rightarrow D}$ 能耗多,则权值也会增大。

Dijkstra 算法根据簇首间距离权值选择最短路径,计算出每个簇首到直接通信簇首的最短路径,本质上就是最低能耗路径,这样可以在路由中减少能耗,同时均衡簇首节点负载。

基于分簇的多跳路由算法流程如图 1 所示。

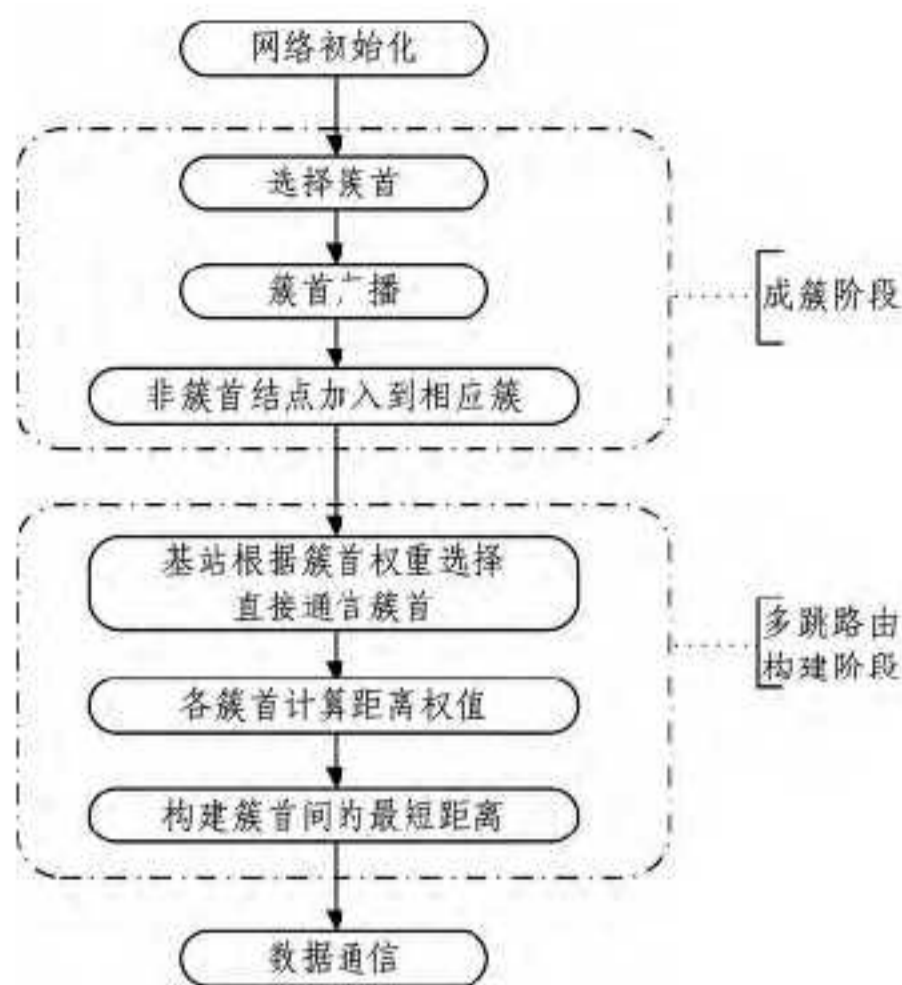


图1 基于分簇的多跳路由算法流程

4 仿真研究

4.1 仿真环境

为了测试本文算法的性能,利用 NS2 进行仿真实验,并与 LEACH 进行对比分析。仿真环境的参数如表 1 所列。

表 1 仿真环境参数

参数名称	参数值
节点分布范围	100m×100m
节点总数	400
基站节点位置	(50m,120m)
节点初始能量	2J
数据包大小	1000bit
广播包大小	80bit
E_{elec}	50nJ/bit
E_{DA}	5nJ/bit/signal

4.2 仿真结果分析

如图 2 所示,仿真结果描述了 LEACH 与本文算法的网络存活节点数目和网络时间之间的关系。从图中可以看出,在网络进行到 1400 轮时,本文算法的仿真结果表明,网络中死亡节点约占 78%;而相反,LEACH 协议下的网络节点在 1200 轮时就已经死亡近 88% 的节点。

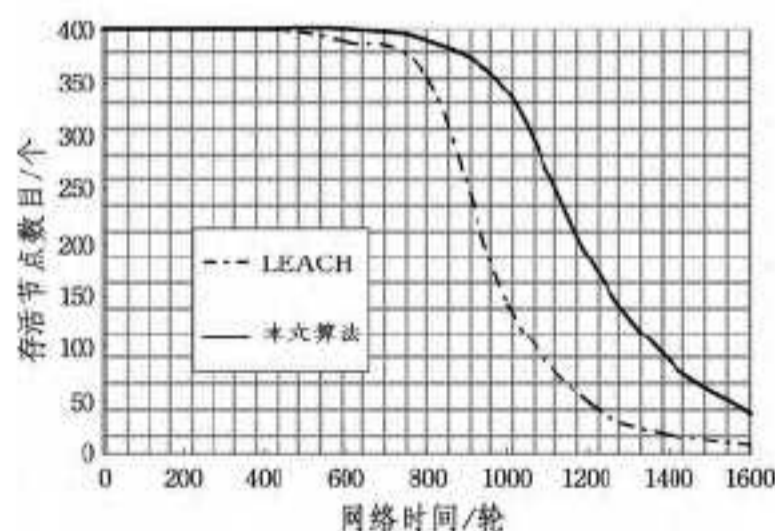


图 2 网络存活节点与网络运行时间关系图

图 3 描述了两种算法的网络通信能耗与网络运行时间的关系。仿真结果表明,LEACH 协议运行时,在 1200 轮网络通信约耗费了 91% 的能量,而本文的算法此时耗费了 85% 的能量,且推迟到 1400 轮时才耗费相同的能耗(约 91%)。当网络运行到 800 轮时,LEACH 协议耗费了 61% 的网络能量,本文算法只有 43% 的能耗,比 LEACH 协议节省能耗约 40%。上述结果表明,相较于 LEACH 协议,本文提出的算法

能够更好地均衡网络能耗,减少网络能量耗费,延长网络生存时间。

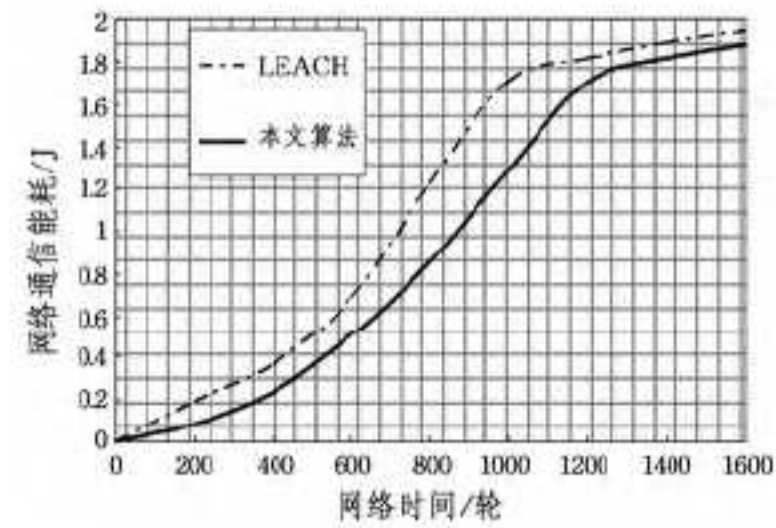


图 3 网络通信能耗与网络运行时间关系图

结束语 针对无线传感器网络的特点,本文提出了一种基于分簇的多跳路由算法。算法中,为了防止低能量的节点被选为簇首而造成网络空洞的产生,本文引入了能量控制因子的概念。通过约束簇的数目,提高了网络的能量利用率,维持了网络的稳定性。在簇首与基站的通信中,本文采用基于最短距离的多跳路由算法。距离权值的引入,平衡了簇首间的距离以及能耗关系,而利用簇首权重选取合适的直接通信簇首,解决了不同距离的簇首之间的能耗平衡。仿真实验表明,本文算法较 LEACH 协议能够更好地均衡网络能耗,延长网络的生存时间。

参考文献

- [1] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proc of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences. 2000;1-10
- [2] Zhu Yong, Qing Pei. A Energy-Efficient Clustering Routing Algorithm Based on Distance and Residual Energy for Wireless Sensor Networks[J]. Procedia Engineering, 2012, 29:1882-1888
- [3] Lee S, Choe H, Park B, et al. LUCA: an energy-efficient unequal clustering algorithm using location information for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 56: 715-731
- [4] Kumar D, Aseri T C, Patel P B. A Novel Multihop Energy Efficient Heterogeneous Clustered Scheme for Wireless Sensor Networks[J]. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2011, 14(4):359-368
- [5] Yi Sang-ho, Heo Jun-young, Cho Yoo-kun, et al. PEACH: power-efficient and adaptive clustering hierarchy protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Communication, 2007, 30: 2842-2852
- [6] Zhao Yan. Improved route algorithm of wireless sensor networks[J]. Computer Simulation, 2012(4):138-141
- [7] Tang Qiang, Wang Bing-wen, Dai Zhi-cheng, et al. Semi-centralized Clustering Protocol with Energy Balance and Multi-hop Transmissions[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(4):583-586
- [8] Yu Ji-guo, Qi Ying-ying, Wang Guang-hui, et al. A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2012, 66:54-61