

基于能量的无线传感器网络分簇路由算法^{*}

张秋余, 彭 铎, 刘洪国

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

摘要: 无线传感器网络存在严重的能量约束问题, 网络协议的首要设计目标就是要高效地使用传感器节点的能量, 延长网络的存活时间。在分析经典的分簇路由协议 LEACH 的基础上, 针对其不足提出了基于能量的改进算法和分簇规模约束机制平衡节点能量消耗。仿真实验表明, 改进算法有效地延长了网络生存周期。

关键词: 无线传感器网络; 路由算法; 能量有效

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)02-0674-03

Clustered routing algorithm based on energy for wireless sensor networks

ZHANG Qiu-yu, PENG Duo, LIU Hong-guo

(School of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: On the basis of understanding of routing protocol——low energy adaptive clustering hierarchy (LEACH), this paper analyzed its shortcoming and improvement. The new algorithm balanced energy depletion of node by two methods. One was considering the energy of nodes when selecting cluster heads, another was limited number of nodes in each cluster. Simulation results show that the effectiveness of the improved algorithm and prove the improved algorithm is much better than LEACH in energy consumption and lifetime of network.

Key words: wireless sensor network (WSN); routing algorithm; energy efficient

0 引言

无线传感器网络 (WSN) 是一种由大量微小的集成 (包括传感器、数据处理单元和无线通信模块) 的节点组成的以数据为中心的无线自组织网络。WSN 在社会生活各个领域具有十分重要的科研价值和巨大的实用价值。2001 年 1 月,《MIT 技术评论》将 WSN 列于十种改变未来世界新兴技术之首^[1,2]。在我国, 2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术确定了三个前沿方向, 其中两个与 WSN 的研究直接相关, 即智能感知技术和自组织网络技术。

作为一种典型的普适计算 (pervasive computing) 应用, WSN 通过大量部署在监测区域内的传感器节点, 采集监测者所关注的信息, 通过无线方式, 将收集并简单处理后的信息发送到目标用户。由于无线传感器网络通常部署在人无法接近或者高危险区域且数量众多, 这使得随时更换节点能源变得非常困难。节点通常携带一次性电池供电, 因此传感器网络存在严重的能量约束问题。所以, 传感器网络协议的首要设计目标就是要高效地使用传感器节点的能量, 延长整个网络的存活时间。

1 路由协议及其分类

从网络拓扑结构的角度可以把无线传感器网络路由协议分为平面路由协议和分簇 (clustering) 路由协议两类。在平面

路由协议中, 所有网络节点的地位是平等的, 不存在等级和层次差异, 通过相互之间的局部操作和信息反馈来生成路由。典型的平面路由算法有定向扩散 (directed diffusion) 协议^[3]、SAR (sequential assignment routing)^[4]、SPIN (sensor protocols for information via negotiation)^[5]、Rumor Routing^[6]等。平面路由的最大缺点在于: 网络中无管理节点; 缺乏对通信资源的优化管理; 自组织协同工作算法复杂; 对网络动态变化的反应速度较慢等^[7]。

将传感器节点组织成簇的形式可以有效地减少网络的能量消耗。在分簇的拓扑管理机制下, 网络中的节点可以划分为簇头节点 (cluster head) 和成员节点两类。在每个簇内, 根据一定的机制算法选取某个节点作为簇头, 用于管理或控制整个簇内成员节点, 协调成员节点之间的工作, 负责簇内信息的收集和数据的融合处理以及簇间转发^[8]。

LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy)^[9] 是 WSN 中最早提出的分簇路由协议。其成簇思想贯穿于之后提出的很多分簇路由协议中。LEACH 采用所有节点轮流担任簇头节点的方法来达到使所有节点均匀消耗能量的目的, 它也是第一个提出数据聚合的分簇路由协议。

2 LEACH 协议及其存在的问题

2.1 LEACH 协议分析

LEACH 是按照循环方式构建的。每一循环称之为为一轮

收稿日期: 2008-04-20; **修回日期:** 2008-07-04 **基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAF01A21)

作者简介: 张秋余 (1966-), 男, 河北辛集人, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为信息安全、图像处理、模式识别、软件工程、计算机视觉 (zhangqy@lzu.cn); 彭铎 (1976-), 男, 甘肃兰州人, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机网络与通信、无线通信; 刘洪国 (1980-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究方向为多媒体通信、信息隐藏。

(round)。每一轮被进一步划分为建立阶段和稳态阶段。建立阶段 (setup phase) 开始于节点自选举为簇头的过程,各节点独立地按照一定概率决定是否做簇头。选举方法是:每个节点产生一个 0~1 的随机数,如果这个数小于阈值 $T(n)$,则该节点向周围节点广播它是簇头的消息。 $T(n)$ 的计算公式为

$$T(n) = \begin{cases} p^{1/r} \times [r \bmod (1/p)] & n=G \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

其中: P 是簇头占有所有节点的百分比,即节点当选簇头的概率; r 是目前循环进行的轮数; G 是最近 $1/P$ 轮中还未当选过簇头的节点集合。从 $T(n)$ 可以看出,当选过簇头的节点在接下来的 $1/P$ 轮循环中将不能成为簇头,剩余节点当选簇头的阈值 $T(n)$ 增大,节点产生小于 $T(n)$ 的随机数的概率随之增大,所以节点当选簇头的概率增大。

在后续的广告阶段 (advertisement phase),簇头用一个广告消息发送给邻居节点。簇头使用 CSMA 协议与隐终端争用媒体。在分簇建立阶段,节点通过检测收到信号的强弱来决定加入哪个分簇,之后簇头了解成员的数量及其标志,并建立一个 TDMA 时间表,随机地拾取一个 CDMA 码,并将该信息在广播时间表的子阶段进行广播,每个节点只在自己的时间片内进行数据传输。簇建立之后,TDMA 稳态阶段开始,簇头将节点收集的信息传送到收集点 (sink) 节点,直到本轮结束。其组织结构如图 1 所示。

2.2 LEACH 协议存在的问题

LEACH 协议中,簇头是周期性按轮随机选举的,这保证了网络各节点有平等的机会成为簇头,平衡了节点的能耗。但这是一个理想化的结果,必须满足两个前提条件: a) 每个节点初始能量均等; b) 每个节点在担任簇头期间耗费的能量均等。实际上,由于每个簇的大小以及簇头到基站的距离都不一样,条件 b) 很难达到,这就使得有些节点的能量消耗较快,有些节点的能量消耗较慢,经过一段时间后,有些节点能量较少但却被选举为簇头,这就加速了节点的死亡,大大减少了网络生存周期。其次,在 LEACH 协议中,由于簇首选举的随机性使得网络的簇首需要负担的节点数不同,加重了个别簇首节点的负担,使得簇间负载不均衡,整个网络的负载平衡程度下降,而在网络规模较大时簇头之间必须采用多跳方式将数据传送到 sink 节点,这就使得靠近 sink 节点的簇头因为承担了更多的转发任务,能量消耗较快,影响了网络的生存周期。

3 改进后的路由协议

基于 LEACH 协议中存在的问题,本文在两个方面对它进行了改进。改进算法仍使用 LEACH 协议的网络模型。

首先,在簇头选举阶段,对候选簇头增加考虑能量因素,改进了 $T(n)$ 的计算方法。

$$T(n) = \begin{cases} p^{1/r} \times [r \bmod (1/p)] \times \sqrt{E_{current}/E_0} & n=G \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $E_{current}$ 表示节点的当前能量; E_0 表示节点的初始能量。式 (2) 的改进使能量消耗比较低的节点比能量消耗高的节点优先当选簇头,平衡了节点间的能量消耗,从而可以延长网络的生存周期。此改进还考虑到能量因素对 $T(n)$ 的影响程度,使得节点能量都较多时,能量因素的影响相对较大;当节点能量

普遍较少时,能量因素的影响相对较小。改善了当网络运行较长时间后,所有节点的当前能量 $E_{current}$ 都变得很低,使得阈值 $T(n)$ 变小,所有节点成为簇头的概率都降低,每轮当选的簇头数量减少,最终导致网络能量耗费不均衡的问题。

其次,基于协议中存在的簇间负载不均衡的问题,提出了一种分簇规模约束机制,即在簇的形成过程中,设置簇内节点数目的最大值 N_{max} 和最小值 N_{min} ,控制簇的规模,保持簇间负载均衡。

具体过程为:在网络初始阶段,汇聚点需要用较大的发送功率向所有节点广播一个信号。每个传感器节点在收到此信号后,根据接收信号的强度计算它到汇聚点的近似距离 (RSSI),记这个距离为 $D_{(i)-sink}$ 。一旦第 i 个节点当选为簇头节点,其簇内节点的数目为

$$N = [q + (D_{(i)-sink} - D_{min}) / (D_{max} - D_{min})] (1/p - 1) \quad (3)$$

其中: D_{max} 和 D_{min} 分别代表网络中的节点到 sink 节点距离的最大值和最小值; $D_{(i)-sink}$ 代表节点 i 到汇聚点的距离; q 是一个加权因子。簇内节点数目的最大值 N_{max} 和最小值 N_{min} 由 q 决定,本文取 $q = 1/2$ 此时:

$$N_{max} = 3/2 (1/p - 1) \quad (4)$$

$$N_{min} = 1/2 (1/p - 1) \quad (5)$$

从式 (3) 可以看出,簇内节点数目与节点到 sink 点的距离呈线性递减关系。簇头按照信号强度决定接受哪些节点为其成员节点。当簇内节点数目超过规定值后,簇头就不再接纳新节点。这就使得靠近汇聚点的簇规模小,数量多,远离汇聚点的簇规模大,数量少,达到控制簇的规模,保持簇间负载均衡的目的。改进的算法流程如图 2 所示。

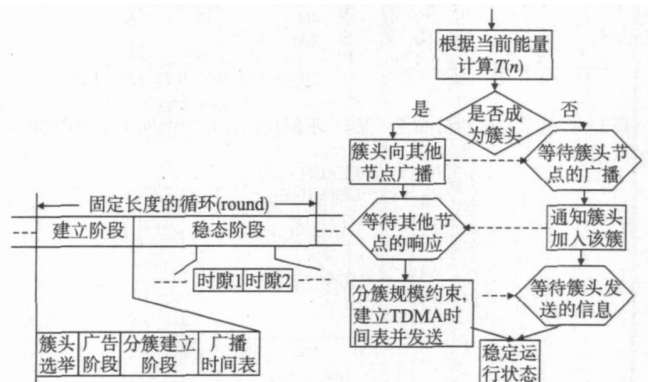


图1 LEACH的组织结构

图2 改进的算法流程图

4 仿真及其分析

4.1 能量模型及仿真环境

本文用 NS2 软件对改进算法与 LEACH 算法进行了仿真比较。主要从簇头节点的能耗和网络生存时间两个方面进行了比较,以此来评价改进后的性能。为了加以区别,将改进后的算法记为 LEACH_E。在这里将网络生命周期定义为出现第一个因能量耗尽而失效的节点所需的时间 (first node dies FND)。节点采用与文献 [10] 相同的无线通信能量消耗模型,节点发射 1 bit 的数据消耗的能量主要分为发射电路损耗和功率放大损耗两部分,即

$$E_{Tx}(1, d) = \begin{cases} E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2, & d < d_0 \\ E_{elec} + \epsilon_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: E_{elec} 表示发射电路损耗的能量; ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为这两种模

型中功率放大所需的能量; d 为两节点间距离。当传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大损耗采用自由空间模型, 能量消耗与 d^2 成正比; 当传输距离大于等于阈值 d_0 时, 采用多路径衰减模型, 能量消耗与 d^4 成正比。节点接收 1 bit 的数据消耗能量为

$$E_{Rx}(1) = E_{elec} \quad (7)$$

这里假设簇头节点有理想的数据融合, 即分别接收 n 个簇内节点的数据 1 融合后为 1 bit。簇头节点在作为中继节点时, 首先接收数据然后再转发出去。能耗就由两部分组成:

$$E_{head}(d) = E_{Rx} + E_{Tx} + E_{elec}n + \epsilon_{mp}d^2 = (n+1)E_{elec} + 2\epsilon_{mp}d^2 \quad (8)$$

在仿真中使用了以下参数。网络大小为 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$, 随机生成 100 个传感器节点, 如图 3 所示, sink 节点位于坐标 $(150, 0)$ 处。 E_{elec} 为 50 nJ/bit , ϵ_{fs} 为 10 pJ/bit/m^2 , ϵ_{mp} 为 0.0013 pJ/bit/m^4 , l 为 4000 bit , d_0 为 75 m 。

4.2 仿真结果

分别比较节点初始能量为 $0.25, 0.5, 1\text{ J}$ 的情况下, 改进算法与 LEACH 协议的网络生命周期, 如图 4 所示。从图中可以看出, 改进算法比 LEACH 算法在不同初始能量下, 网络运行的轮数分别延长 $26\%、24\%、32\%$, 明显延长了网络生命周期。图 5 显示某一相同规模簇的簇头节点的能耗。从图中可以看出, 改进算法的簇头能耗相对较低, 也就是说, 采用分簇规模约束机制和簇间转发方式可有效地节约簇头能量, 平衡簇间负载。

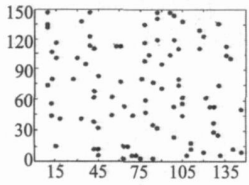


图3 传感节点随机分布图

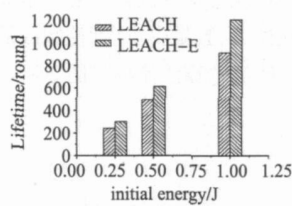


图4 不同初始能量时的网络生存周期

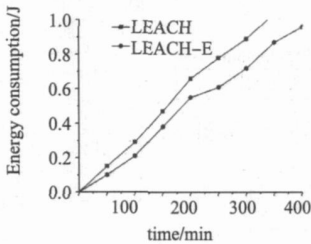


图5 簇头能耗

5 结束语

本文在分析经典的分簇路由协议 LEACH 的基础上, 针对

其不足提出在簇头选举中增加考虑节点当前能量的因素来解决部分能量少的节点当选簇头的问题, 使得能量大的节点成为簇头的概率相对更大, 有效地延长了节点存活时间。同时采用分簇规模约束机制改善了簇头之间的负载不均衡问题。仿真实验表明, 以上措施有效地平衡了节点能量消耗, 延长了网络生存周期。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU Wei-lian, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor network[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] REN Fengyuan, HUANG Haining, LN Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 4(7): 1282-1291.
- [3] NTANAGONWAT C, GOVINDAN R, ESIRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]//Proc of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing. Boston, MA: [s.n.], 2000.
- [4] SHAH R C, RABAEY J. Energy aware routing for low energy Ad hoc sensor networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2002.
- [5] KULK J, HENZELMAN W R, BALAKRISHNAN H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(2-3): 169-185.
- [6] BRAGNSKY D, ESIRIN D. Rumor routing algorithm for sensor networks[C]//Proc of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications 2002.
- [7] SHEN Bo, ZHANG Shiyong, ZHONG Yiping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1588-1600.
- [8] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] HENZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf on System Sciences Maui. IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [10] HENZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

(上接第 670 页)大, 两种模式的可靠性都在不断下降; 在相同网络规模时, 可维修链路模式的可靠性要优于不可维修链路模式的可靠性。

参考文献:

- [1] CHEN Xiao. Fault-tolerance adaptive and shortest routing in 2D extended Meshes using faulty block information[C]//Proc of 2000 International Workshops on Parallel Processing 2000: 267-274.
- [2] 陈育斌, 李建东, 陈家模, 等. 计算通信网络整体概率连通性的一种新算法[J]. 通信学报, 2000, 21(9): 91-96.

- [3] 刘爱民, 刘有恒. 关于可修复系统的 MTBF 和 MTTR[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 70-72.
- [4] HSU S J, YUANG M C. Efficient computation of marginal reliability importance for reducible networks[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2001, 50(1): 98-106.
- [5] 王衍, 张彪, 张友鹏, 等. 基于 Markov model 的容错计算机连锁系统可靠性分析[J]. 电气自动传动化, 2007, 29(2): 8-11.
- [6] CHEN H L. Submesh determination in faulty Tori and Meshes[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(3): 272-282.