

高能量有效的基于分簇的无线传感器 网络路由协议*

戴世瑾, 李乐民

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术重点实验室, 成都 610054)

摘要: 在无线传感器网络能量消耗模型的基础上, 分析了经典的分簇路由算法 LEACH 的不足, 提出了一种高能量有效的分簇路由算法(HEHC), 算法重新考虑了通信过程中的能量损耗, 并依据能量因子参数优选簇首, 同时使用了分簇规模约束机制。仿真结果表明, 该算法能有效地减少能量损耗, 延长网络的生存周期。

关键词: 无线传感器网络; 路由协议; 簇; 能量有效

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)06-2201-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.058

High energy-efficient cluster-based routing protocol for WSN

DAI Shi-jin, LI Le-min

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: This paper analyzed the LEACH's shortcomings, based on the energy consumption model in WSNs. It proposed a novel high energy-efficient hierarchical cluster-based routing protocol (HEHC) for WSNs in the aftermentioned content. HEHC presented a new strategy of cluster heads selection and cluster formation. The simulation results show that the HEHC protocol can efficiently save the energy consumption and prolong the wireless sensor network lifetime.

Key words: wireless sensor networks(WSN); routing protocol; cluster; energy-efficient

0 引言

微机电系统以及处理器技术、存储技术的飞速进步, 极大地推动了价格低、功耗小、功能多的微传感器的快速发展, 从而使其能够在微小体积内集合了信息采集、数据处理和无线通信的能力。无线传感器网络(WSNs)由布置在观测区域内的成百上千的传感器节点, 通过无线 Ad hoc 方式自组织组成。节点之间通过无线方式进行通信, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息, 并发送给汇聚节点(sink 或 base station)。由于 WSNs 可以广泛地应用于国防军事、环境监测、交通管理、医疗卫生、制造业、反恐抗灾等各个领域, 受到了学术界和工业界的广泛关注^[1-3], 但由于其节点能量受限, 在设计无线传感器网络路由协议时, 能量有效性就成为首要的考虑因素。

无线传感器网络的路由协议按照网络结构可划分为平面型和分级型路由协议。在平面式路由协议中, 所有节点的地位是平等的, 原则上不存在瓶颈问题。典型的平面路由算法有定向扩散(directed diffusion)、SPIN(sensor protocol for information via negotiation)、Rumor Routing 等。由于平面型路由协议需维持较大的路由表, 可扩展性差, 不适用于较大规模的无线传感器网络; 分级型路由协议通过将传感器节点组织成簇的结构, 可在一定程度上解决此类问题。文献[4, 5]比较了当前典型的分簇路由算法的特点和适用情况, 其中 LEACH(low energy

adaptive clustering hierarchy) 协议就是一种典型的考虑了优化能量使用效率的比较成熟且常用的分级型路由算法。在 LEACH 算法中第一次提出了分簇的概念, 同时它也是第一个提出数据融合的分簇路由算法。其成簇的思想贯穿于之后提出的大量分簇路由协议中, 如文献[6~8]中提出的算法均是基于成簇的网络拓扑结构。

1 LEACH 协议及其存在的问题

MIT 的 Heinzelman 等人^[9]提出了一种基于分簇的低能耗自适应路由协议 LEACH, 算法中传感器节点自组织成为不同的簇, 每个簇中均有一个簇首节点。簇内其他节点将感知的数据发送给本簇的簇首节点, 簇首节点将数据进行一些特定的处理(数据融合)后转发给远端的 sink 节点。因此, 担任数据融合及数据转发任务的簇首节点所消耗的能量要远高于非簇首节点的能量消耗。如果簇首节点固定不变, 那这些节点的能量将很快耗尽, 其簇内的其他节点将失去与远端汇聚节点通信的能力。所以 LEACH 算法提出簇首随机轮换算法以避免某些节点的能量很快耗尽。LEACH 中的操作分成一次次的循环, 每次循环称之为轮(round), 每轮由簇建立和稳定的数据传输两个阶段组成。通常情况下, 稳定态持续较长的时间。在簇建立阶段, 每个节点自身产生一个 0~1 的随机数, 并与门限值 $T(n)$ 进行比较, 小于门限值则该节点成为簇首。 $T(n)$ 的计算式如下:

收稿日期: 2009-11-09; 修回日期: 2009-12-10 基金项目: 国家“973”计划资助项目(2007CB307100)

作者简介: 戴世瑾(1976-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络、Ad hoc 网络、无线资源管理(daiphd2002@msn.com); 李乐民(1932-), 男, 浙江吴兴人, 中国工程院院士, 教授, 博导, 主要研究方向为通信网、宽带通信网、移动通信网。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} & \text{如果 } n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2 & d < d_{crossover} \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4 & d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (2)$$

传感器节点接收 k bit 信息需要的能量为

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (3)$$

其中： E_{elec} 是发送电路和接收电路消耗的能量； ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为两种情况下放大器功率放大所需的能量。当传输距离 d 小于门限值 $d_{crossover}$ 时，功率放大损耗采用自由空间模型，能量消耗与 d^2 成正比；当传输距离大于或等于门限值 $d_{crossover}$ 时，采用多径衰落模型，能量消耗与 d^4 成正比。

簇首节点的能量消耗用于以下几个方面，即建立簇时通信所需能量、接收簇内非簇首节点数据、进行必要的融合以及传输经处理的数据给 sink 节点所需能量。经计算，簇首节点能量消耗 E_{CH} 如下所示：

$$E_{CH} = k(E_{elec} + \epsilon_{fs}d_{toCH}^2) + kE_{elec}(T/N - 1) + kE_{DA}T/N + \alpha k(E_{elec} + \epsilon_{mp}d_{toBS}^4) \quad (4)$$

其中： α 为数据融合系数，为计算方便，取 α 的值为 1； E_{DA} 为单位比特数据融合所需能量； d_{toCH} 为簇内非簇首节点到簇首节点的距离； d_{toBS} 为簇首节点到 sink 节点的距离。根据文献[9]，可计算得出

$$E[d_{toCH}^2] = \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{N} \quad (5)$$

其中： M 为传感器网络区域的边长。

非簇首节点消耗的能量 E_{non-CH} 用于建立簇时通信所用以及传输感知到的数据，经计算如下所示：

$$E_{non-CH} = NkE_{elec} + k(E_{elec} + \epsilon_{fs}d_{toBS}^2) \quad (6)$$

根据上面的公式，可以得到每轮循环中每个簇所消耗的能量 $E_{cluster}$ 如下式所示：

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{T}{N} - 1 \right) E_{non-CH} \quad (7)$$

考虑到 $(T/N - 1) \approx T/N$ 后，式(7)可转换为

$$E_{cluster} = E_{CH} + (T/N) E_{non-CH} \quad (8)$$

因此，一轮循环中传感器网络消耗的总能量 E_{round} 为

$$E_{round} = NE_{cluster} \quad (9)$$

式(9)最终可为

$$E_{round} = kE_{elec}(2T + NT) + (T/N + 1)k\epsilon_{fs}M^2/(2\pi) + kE_{DA}T + KN(E_{elec} + \epsilon_{mp}d_{toBS}^4) \quad (10)$$

由此，可以最终确定最优的簇首节点数目 N_{opt} ，如下式所示：

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{T}{2\pi}} \frac{M \sqrt{\epsilon_{fs}}}{\sqrt{E_{elec}(T + 1) + \epsilon_{mp}d_{toBS}^4}} \quad (11)$$

在确定了最优簇数目后，传感器网络整体能量消耗将尽可能降到最低，同时在每轮循环中的能量消耗也是最小，综合两方面的作用将有效地提高整个网络的生存周期，从而使传感器网络性能得到优化，能更有效地监测被控环境。

传感器节点在自我选择是否成为簇首节点时，本文使用了基于节点 s_i 在第 r 轮循环时的剩余能量 $E_i(r)$ 作为参数的新的门限值 $T_{new}(i)$ ，从而可以保证具有更多剩余能量的节点能更多地担任簇首工作，以延长网络的生存周期。 $T_{new}(i)$ 如下所示：

$$T_{new}(i) = \frac{N}{T - N \times (r \bmod \frac{T}{N})} \times \frac{E_i(r)}{E(r)} \quad (12)$$

其中： $E(r)$ 表示第 r 轮循环时网络节点的平均能量，由于平均

其中： p 为簇首节点占网络中节点总数的百分比，也即节点成为簇首的概率； r 为当前循环进行的轮数； G 是在最后的 $1/p$ 轮循环中还未成为簇首的节点集合。由 $T(n)$ 的计算公式可以得知，当选过簇首的节点在接下的 $1/p$ 轮循环中将不能成为簇首。节点成为簇首后，该簇首发出广播消息，非簇首节点根据接收到广播消息的信号强度动态地自动形成簇，簇首为其簇成员分配传输时隙。在稳定的数据传输阶段，传感器节点持续采集监测数据，并在其分配的通信时隙将数据传送到簇首，其余时间传感器节点处于休眠 (sleep) 状态以节约能源。簇首接收到所有的数据后，先进行数据融合，随后把融合后的数据发送给汇聚节点。

在实际应用中，最优 p 值的确定是十分困难的，它与网络的规模、节点密度和汇聚节点的位置等均密切相关。在理想状况下，LEACH 算法可保证各网络节点均有平等的机会成为簇首，这基于以下的假设：a) 网络中的传感器节点为同构，即该无线传感器网络由完全相同的传感器节点组成 (如初始能量、功能等)；b) 各簇首节点在担任簇首期间消耗相同的能量。然而，由于实际成簇时每个簇大小不等，以及各簇首到基站的距离不等，从而使得条件 b) 很难达到。网络运行一段时间后，其中有些节点的能量消耗较快，有些节点的能量消耗较慢，此时，能量较少的节点若被选为簇首，则加速了节点的死亡，将大大减少传感器网络的生存周期。

2 HEHC 算法

基于 LEACH 协议中存在的问题，本文提出了一种高能量有效的算法 HEHC。该算法从以下三个方面着手解决问题：a) 结合簇建立阶段通信能量损耗计算出最优簇数目；b) 设定新的簇首选择门限从而保证剩余能量高的节点更多地担任簇首工作；c) 提出了一种分簇规模约束机制用于确保簇间负载均衡。

根据文献[9]，最优簇的数目是在分析每轮循环传感器网络消耗能量的基础上得到的。其基本思想是选择最优的簇数目 N 使得每轮循环网络消耗的总能量最少。为了简化算法，首先假设每个簇中的节点数目都是相等的，这样如果传感器网络的节点总数为 T ，有 N 个簇，则每个簇内的传感器节点数目为 T/N 。

传感器网络中能量消耗主要用于以下三个部分，感知数据、数据融合和通信。由文献[10, 11]可知，通信过程中消耗的能量要远远高于数据融合消耗，而感知数据所需能量最少，因此，在考虑每次循环网络所消耗的能量时，只考虑通信及数据融合所消耗的能量。由此，每轮循环中传感器网络的能量消耗可分为两部分考虑，即簇首节点消耗的能量和非簇首节点消耗的能量。

本文采用文献[9]中的能耗模型，基于以下两个假设：

a) 网络中使用同构节点 (node)。

b) 无线传感器网络的无线通信信道是对称的，也即从 A 到 B 传输一个消息所消耗的能量与从 B 到 A 传输一个消息消耗的能量相同。

根据上述能耗模型，传感器节点 (node) 发送 k bit 信息传输 d m 距离消耗的能量 E_{Tx} 为

能量只是作为节点剩余能量的参考值,使用估计值并不会影响算法的性能。如果知道网络的生存周期,就能够近似估计网络每轮循环的平均能耗。假设在理想情况下,网络在每一轮循环中所消耗的能量是一样的,即令所有的节点在几乎相同的时刻死掉,则可以得到网络生存时间的估计值 R 。假设每个节点均匀消耗能量,即每个节点每轮循环中消耗相同的能量,于是可计算出第 r 轮循环时网络中每个节点的平均能量 $E(r)$ 为

$$E(r) = E(1 - r/R) \quad (13)$$

其中: E 为节点的初始能量。

在簇形成的过程中,HEHC 算法提出了一种分簇规模的约束机制,即在簇形成阶段,设置簇内非簇首节点数目的门限值以控制簇的规模。具体流程为:在传感网络部署形成后,汇聚节点用大功率向全网所有传感器节点广播一个信号,每个节点在接收到信号后根据信号强度估算出其到汇聚节点的近似距离,此距离记为 D_{sink} 。在簇首选择阶段,一旦节点 i 当选为簇首,其簇内非簇首节点数目的门限值为

$$S(i) = [n + (D_{\text{sink}} - D_{\text{min}})/(D_{\text{max}} - D_{\text{min}})](1/p - 1) \quad (14)$$

其中: D_{max} 和 D_{min} 分别代表传感节点到汇聚节点距离的最大值和最小值; n 为加权因子,决定簇规模大小,本文中取 $n = 2/3$ 。从式(14)中可以看出,簇内节点数目与节点到汇聚节点的距离呈线性递增的关系,即距离 sink 节点近的簇规模小、数量多,远离 sink 节点的簇规模大、数量少。簇建立过程中,簇首按照接收到的信号强度决定接受哪些节点作为其簇内节点。当簇内节点数达到门限值 s 时,簇首节点将拒绝接受新的节点成簇。这样,就达到了控制簇规模的目的,使得簇间保持了负载均衡。

3 实验仿真及结果分析

仿真实验是基于笔者编写的 C 代码,并用 Visual C++ 6.0 软件对实验进行了分析仿真,并与 LEACH、LEACH-E、EECHS 协议进行了对比,主要从网络生存周期和簇首节点能耗两个方面进行了比较。仿真环境设置如下:将 100 个初始能量为 2 J 的传感器节点随机分布在 $(x = 0, y = 0)$ 和 $(x = 100, y = 100)$ 组成的正方形区域内组成实验用传感器网络, sink 节点位于 $(x = 50, y = 175)$ 的位置。在仿真中网络拓扑如图 1 所示,设置的环境变量参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	取值	参数	取值
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ³	ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
T	100	k	4000 bit
M	100 m	$D_{\text{crossover}}$	87 m
X_{sink}	50	Y_{sink}	175
E_{DA}	5 nJ/bit/signal	E_{elec}	5 nJ/bit

网络生存周期与剩余存活节点数的对比仿真如图 2 所示。使用 LEACH-E、EECHS、HEHC 协议,网络运行的轮数分别延长了 13.4%、22.1%、39.5%, HEHC 算法的网络生存周期最长,明显延长了网络的生存周期。图 3 给出了前 10 轮四种算法簇首消耗总能量的比较, HEHC 的簇首能量消耗明显小于其余三种算法。由此可知, HEHC 通过使用新的选取簇首门限值,结合簇建立阶段通信能量损耗计算出的最优簇数目,以及采用分簇规模约束机制可以有效节省簇首能量损耗,均衡簇间负载均衡,延长无线传感器网络的生存周期,是一种高能量有

效性的路由协议。

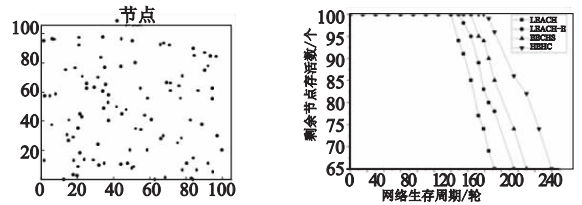


图 1 100个节点的无线传感器网络

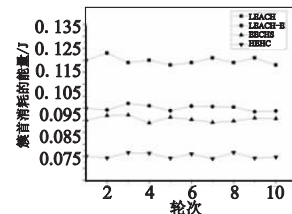
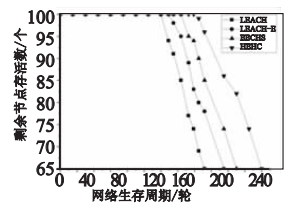


图 3 簇首消耗能量总和

4 结束语

本文针对无线传感器网络,在理论分析的基础上提出了一种高能量有效性的基于分簇结构的无线传感器网络路由协议 HEHC。该算法结合簇建立阶段通信能量损耗计算出最优簇数目,并优化簇首选择策略,制定簇规模约束机制,从而形成最优簇以节省节点能量,均衡了簇间负载。仿真结果表明, HEHC 算法具有高能量有效性,能有效地延长无线传感器网络的生存周期。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks; a survey [J]. Computer Networks (Elsevier), 2002, 38(4): 393-422.
- [2] RAGHUNATHAN V, GANERIWAL S, SRIVASTAVA M. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 108-114.
- [3] DAI Shi-jin, JING Xiao-rong, LI Le-min. Research and analysis on routing protocols for wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Communications, Circuits and Systems. Hong Kong: [s. n.], 2005: 407-411.
- [4] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议 [J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600.
- [5] JIANG Cong-feng, YUAN Dao-min, ZHAO Ying-hui. Towards clustering algorithms in wireless sensor networks: a survey [C]//Proc of IEEE Conference on Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 2009-2014.
- [6] 付华, 赵刚. 无线传感器网络中一种能量均衡的分簇策略 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1494-1496.
- [7] 武春涛, 胡艳军. 无线传感器网络 LEACH 算法的改进 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(3): 80-83.
- [8] 张秋余, 彭锋, 刘洪国. 基于能量的无线传感器网络分簇路由算法 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2): 674-676.
- [9] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [10] RIEDY E J, SZEWCZYK R. Power and control in networked sensors [EB/OL]. <http://www.tinyos.net/papers/cs294-8.pdf>.
- [11] POTTIE G J, KAISER W J. Wireless integrated network sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51-58.