

分簇路由的无线传感器网络通信模式与能量有效性研究

孙勇^① 景博^{①②} 张宗麟^① 张劫^①

^①(空军工程大学工程学院 西安 710038)

^②(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘要: 无线传感器网络中的节点以簇的方式进行路由时, 簇成员可使用单跳或多跳通信模式将感知数据包发送至簇头。该文以簇内成员节点的最大能耗作为评价指标, 研究单簇头情形下单跳和多跳的能量有效性, 得出了通信模式的选择取决于通道衰减系数的结论。考虑到单纯的单跳或多跳模式会引起网络能耗不均衡, 提出簇成员节点以一定概率在单跳和多跳间切换的混合通信模式, 并给出了混合通信模式的工程实现方法。仿真结果验证了混合通信模式在能量有效性和能耗均衡分配方面的优势。

关键词: 无线传感器网络; 单跳; 多跳; 混合模式; 能量有效性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2262-03

Survey on Energy Efficiency of Clustered Routing in Wireless Sensor Network

Sun Yong^① Jing Bo^{①②} Zhang Zong-lin^① Zhang Jie^①

^①(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

^②(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: When nodes are organized as clusters, data packets can be transmitted from cluster members to head in either single hop or multi-hop communication mode. Using maximum energy dissipation of cluster members as evaluation criterion, energy efficiency of these two modes is researched. The conclusion was come to that the optimal communication mode depends on channel path loss. Taking the uneven energy consumption caused by solely single hop or multi-hop mode into consideration, a hybrid communication mode that nodes alternate between single hop and multi-hop mode with certain probability is proposed. The simulation result verifies that hybrid mode provides the best energy efficiency as well as even energy dissipation.

Key words: Wireless sensor network; Single hop; Multi-hop; Hybrid mode; Energy efficiency

1 引言

传统的Ad hoc网络中的节点由于不受能量的约束^[1], 大多采用多对多的通信方式; 无线传感器网络中的节点则因能量的限制而采用多对一的通信方式。当无线传感器网络中的节点以簇的方式协作地对分布区域中的现象监测时, 节点与簇头间的通信方式(单跳或多跳)的选择对网络的效能影响很大。采用单跳通信, 如LEACH^[2], TEEN^[3]等, 距离簇头较远的节点由于远距传输, 耗能巨大; 采用多跳通信时, 如PEGASIS^[4], 距离簇头近的节点由于转发外层节点的数据包, 会因能耗过大而过早失效, 从而影响整个网络的监测性能。文献[5]研究了多跳通信时, 如何确定每个簇内最优簇头数目, 以保证整个网络的能耗最小化。该文既未给出选择多跳通信的依据, 也未以最内环节点能耗最小化作为优化指标确定簇头数目。本文以 2D连续监测为例, 研究无线传感器网络分簇路由时, 单跳和多跳通信模式的能量有效性。通过

理论推导给出了通信模式的选择与通道衰减系数的关系, 并将结论推广到 3D情。结合单跳和多跳通信模式的能量分布, 提出了单跳与多跳相结合的混合通信模式。仿真结果表明: 混合通信模式的能量有效性优于单纯的单跳或多跳; 同时, 整个网络的能耗均衡, 未出现内外环节点能耗差异较大的现象。

文章内容安排如下: 第 2 节简要介绍了节点收发数据包的能耗模型; 第 3 节研究了单跳和多跳的能量有效性, 并给出了通信方式的选择与通道衰减系数的关系; 第 4 节从工程实现的角度提出了混合通信模式, 证明了该模式的能量有效性优于单纯的单跳或多跳模式; 第 5 节通过仿真实验, 验证了理论分析的正确性; 最后是结束语。

2 节点收发数据包的能耗模型

采用文献[6]的能耗模型, 节点将一个数据包传输至 x 处的能耗为 $l + \mu x^k$ 。其中 l 为传输部分电路的能耗, μx^k 为射频放大器为补偿通道衰减的能耗。节点能耗模型如图 1 所示:

通道衰减系数 k 的取值与节点所处监测区域的环境有关, 有障碍物遮挡时 k 取 3~5, 一般情况下取为 2。文献[7]

详细论述了 k 的取值确定方法。

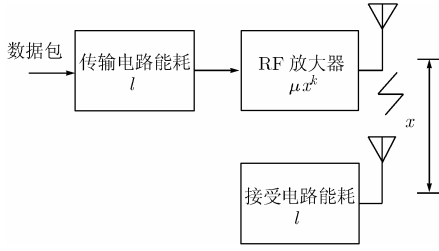


图1 节点能耗模型

节点接受一个数据包时, 只有接收电路处于工作状态, 能耗亦为 l 。因此, 在 x 距离内中继一个数据包的总能耗为 $2l + \mu x^k$ 。

3 单跳与多跳通信模式的能量需求

3.1 多跳通信模式

设 N 个节点随机均匀分布在半径为 a 的圆形区域内, 节点分布密度为 $N/(\pi a^2)$ 。单簇头位于区域中心, 且假设所有节点可保证时间同步。将监测区域划分为 a/R 个同心环带 (R 为多跳半径, 为保证网络的连通概率不低于一定的值, 需满足 $r \leq R \leq a$, 即多跳半径不应小于最短连通半径 r ^[8]), 每个节点每次产生一个感知数据包。则 n 环上的节点平均需转发的数据包为

$$k_n = \frac{(N/(\pi a^2))[\pi a^2 - \pi(nR)^2]}{(N/(\pi a^2))[\pi(nR)^2 - \pi(n-1)^2 R^2]} = \frac{a^2 - n^2 R^2}{(2n-1)R^2}, \quad (1)$$

$$n \in \left[1, \frac{a}{R}\right]$$

若采用多跳通信模式(如图 2(a)所示), n 环上的节点除了向内环发送自身的感知数据包, 还需转发外环的数据包。 n 环上的节点在一个周期内的平均能耗为

$$E_m(nR) = (2l + \mu R^k)k_n + (l + \mu R^k) \quad (2)$$

由于多跳通信时, 内环节点, 特别是距簇头最近的节点承受较大的载荷, 其电池能量决定了整个网络的工作周期。最内环节点在一个周期内的平均能耗为

$$E_m(R) = (2l + \mu R^k)\left[\left(\frac{a^2}{R^2} - 1\right)\right] + (l + \mu R^k) \quad (3)$$

显然, $E_m(R) > E_m(2R) > \dots > E_m(a)$ 。

3.2 单跳通信模式

若采用单跳通信模式(如图 2(b)所示), 节点和簇头间的最大距离为 a 。故在每个工作周期中, 节点的最大能耗为 $E_s(a) = l + \mu a^k$ 。根据单跳的能耗模型可知: 节点距离簇头越近, 能耗越低; 距离簇头越远, 能耗越大。与多跳时的能耗分布相反。

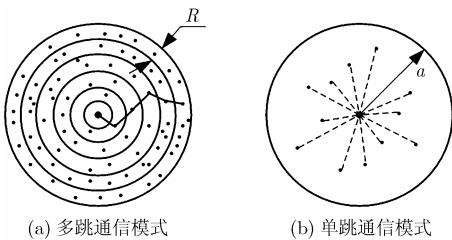


图2 多跳与单跳通信模式示意图

3.3 两种通信模式的能量有效性比较

比较 $E_m(R)$ 与 $E_s(a)$ 的大小, 若 $E_m(R) > E_s(a)$, 表明多跳通信时节点的最大能耗大于单跳情形, 应采用单跳通信; 若 $E_m(R) < E_s(a)$, 则说明单跳通信时节点的最大能耗高于多跳情形, 应采用多跳通信。

下面具体研究 $\Delta E = E_s(a) - E_m(R)$ 与 k , l , μ 及 R 的关系。

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_s(a) - E_m(R) \\ &= l + \mu a^k - (2l + \mu R^k)\left[\left(\frac{a^2}{R^2} - 1\right)\right] - (l + \mu R^k) \\ &= (\mu a^k + 2l) - (\mu R^k + 2l)\left(\frac{a^2}{R^2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

当 $k = 2$ 时, $\Delta E = 2l(1 - a^2/R^2) \leq 0$, 说明单跳通信时的能量有效性优于多跳。设方程 $(\mu a^k + 2l) - (\mu R^k + 2l) \cdot (a^2/R^2) = 0$ 的解为 k_0 , 由于 $\Delta E(k)$ 随 k 单调递增, 当 $k > k_0$ 时, $\Delta E > 0$ 。此时, 多跳的能量有效性优于单跳。

上述结论可推广到 3D 情形:

若监测区域是半径为 R 的球形区域, 节点密度为 $N/[(4/3)\pi a^3]$ 。 n 环上的节点平均需转发的数据包为

$$k_n = \frac{N \frac{4}{3}\pi a^3 \left[\frac{4}{3}\pi a^3 - \frac{4}{3}\pi(nR)^3 \right]}{\frac{4}{3}\pi a^3 \left[\frac{4}{3}\pi(nR)^3 - \frac{4}{3}\pi(n-1)^3 R^3 \right]} = \frac{a^3 - n^3 R^3}{(3n^2 - 3n + 1)R^3}, \quad n \in \left[1, \frac{a}{R}\right] \quad (5)$$

采用多跳通信时, 最内环节点平均能耗为 $E_{m3D}(R) = (2l + \mu R^k)(a^3/R^3 - 1) + (l + \mu R^k)$ 。

$$\begin{aligned} \Delta E_{3D} &= E_{s3D}(a) - E_{m3D}(R) \\ &= (\mu a^k + 2l) - (\mu R^k + 2l)a^3/R^3 \end{aligned} \quad (6)$$

当 $k = 3$ 时, $\Delta E_{3D} = 2l(1 - a^3/R^3) \leq 0$, 说明单跳通信时的能量有效性优于多跳。设方程 $(\mu a^k + 2l) - (\mu R^k + 2l)a^3/R^3 = 0$ 的解为 k_0' , 由于 $\Delta E(k)$ 亦随 k 单调递增, 当 $k > k_0'$ 时, $\Delta E_{3D} > 0$ 。此时, 多跳的能量有效性优于单跳。

4 混合通信模式

不论采用单跳或是多跳, 内外环节点能耗差异较大, 易导致网络能量分布的失衡。若节点在工作周期内以一定的概率在单跳和多跳间切换工作方式, 可削弱单跳时最外环节点和多跳时最内环节点能耗偏大引起的节点失效, 进而提高网络的服务质量 QoS。

在节点内设置一个软定时器, 每个节点完成一次混合通信的时间为 T 。所有节点同时启动定时器, 在 αT 时间内处于单跳通信模式, 在 $(1 - \alpha)T$ 时间内处于多跳通信模式。进入下一个通信周期后所有节点再次转入单跳通信模式, 如此循环下去。则 n 环上的节点在一个通信周期内的平均能耗为

$$\begin{aligned} E_h(nR) &= \alpha E_s(nR) + (1 - \alpha)E_m(nR) \\ &= \alpha(l + \mu n^k R^k) + (1 - \alpha)\left[(2l + \mu R^k) \cdot \frac{a^2 - n^2 R^2}{(2n-1)R^2} + (l + \mu R^k)\right] \end{aligned} \quad (7)$$

为研究方便, 令 $E_s(R) = E_m(a) = e_0$, $E_m(R) = e_1$, $E_s(a) = e_2$ 。

$$E_h(R) = \alpha E_s(R) + (1 - \alpha) E_m(R) \\ = \alpha e_0 + (1 - \alpha) e_1 = -(e_1 - e_0)\alpha + e_1 \quad (8)$$

$$E_h(a) = \alpha E_s(a) + (1 - \alpha) E_m(a) \\ = \alpha e_2 + (1 - \alpha) e_0 = (e_2 - e_0)\alpha + e_0 \quad (9)$$

由于 $e_1 > e_0$, $e_2 > e_0$, 故 $E_h(R)$ 随 α 单调减; $E_h(a)$ 随 α 单调增。

当 $E_h(R) = E_h(a)$ 时, 有 $\alpha = \frac{e_1 - e_0}{e_1 + e_2 - 2e_0}$ 。此时,

$$E_h(R) = E_h(a) = \frac{e_1 e_2 - e_0^2}{e_1 + e_2 - 2e_0}。$$

比较 $E_h(R)$ 与 e_1 , e_2 的大小, 有

$$E_h(R) - e_1 = \frac{-(e_1 - e_0)^2}{e_1 + e_2 - 2e_0} < 0 \quad (10)$$

$$E_h(R) - e_2 = \frac{-(e_2 - e_0)^2}{e_1 + e_2 - 2e_0} < 0 \quad (11)$$

式(10)和式(11)说明, 混合模式的能量有效性优于单纯的单跳或多跳。

5 仿真研究

本节通过仿真, 验证上述理论分析的正确性, 仿真参数见表 1。经计算, 得 $\alpha = 0.5833$ 。图 3 是单跳、多跳和混合通信模式的能耗分布。采用单跳模式时, 一个周期内, 最外环节点的平均能耗为 1.0005×10^{-4} J。采用多跳模式时, 一个周期内, 最内环节点的平均能耗为 1.3995×10^{-4} J。采用混合模式时, 一个周期内, 最外环和最内环节点的平均能耗同为 5.8492×10^{-5} J。这表明, 在表 1 所确定的系统参数下, 单跳模式的能量有效性优于多跳模式, 而混合模式的能量有效性优于单跳模式, 从而也优于多跳模式, 仿真结果与理论分析一致。

表 1 仿真参数

节点数 N	10^3
区域半径 a	1000m
多跳半径 R	50m
通道衰减系数 k	2
l	5×10^{-8} J/bit
μ	1×10^{-10} J/bit/m ²

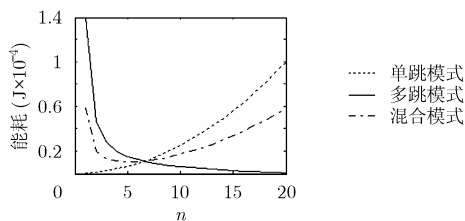


图 3 3 种通信模式的能耗分布

6 结束语

在给出无线传感器节点收发模型的基础上, 系统研究了采用单跳和多跳通信模式时的能量有效性。比较两种通信模式的最大能耗, 得出了通信模式的选取依赖于 l , μ , a 和 R 等系统参数的结论, 并将研究结论推广到 3D 情形。根据单跳和多跳通信模式能量消耗不均衡的特点, 提出了混合通信模式。当节点以一定概率进行单跳和多跳切换时, 整个网络能量分布较之单一的通信模式更均衡。以典型的系统参数对 3 种通信模式进行仿真研究, 显示了混合模式的优势。本文在簇通信方式中, 只研究了单簇头情形, 采用多簇头时的能量有效通信模式以及簇头数目的选取是下一阶段的研究内容。

参考文献

- [1] Mhatre V and Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation. *Ad Hoc Networks*, 2004, (2): 45-63.
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences*, Hawaii, January 2000: 8020-8026.
- [3] Manjeshwar A and Agrawal D P. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001: 2009-2015.
- [4] Lindsey S and Raghavendra C S. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana*, March 2002: 1-6.
- [5] Bandyopadhyay S and Coyle E. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. *IEEE INFOCOM*, San Francisco, CA, 2003: 1713-1723.
- [6] Heinzelman W, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [7] Rappaport T S. *Wireless Communication*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996: 120-145.
- [8] Gupta P and Kumar P R. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. *Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications: A Volume in Honor of W.H. Fleming*, Birkhauser, Boston, MA, 1998: 547-566.

孙 勇: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为检测技术与自动化装置、多传感器信息融合技术、无线传感器网络。
景 博: 女, 1965 年生, 博士后, 教授, 硕士生导师, 研究方向为检测技术与自动化装置、无线传感器网络及远程检测与故障诊断。