

发射功率可变的无线传感器网络能量级别选取

王建明

(湖南商学院计算机与电子工程系, 长沙 410205)

摘要: 针对一种无线传感器网络节点的发射功率可变, 其最大发射半径是最小能量发射半径 r 的 k 倍, 即 kr 的传感器网络, 研究节点最佳能量发射半径 ir 的设计问题。通过数学分析得到能量消耗公式, 给出最优的能量发射级别 k 的计算方法。采用优化的发射功率相比采用固定功率的发射方法能够大幅度地提高网络寿命, 对传感器网络的优化具有较好的指导作用。

关键词: 无线传感器网络; 移动基站; 网络优化; 能量消耗均衡; 网络寿命

Energy Level Selection for Wireless Sensor Network with Variable Transmit Power

WANG Jian-ming

(Department of Computer and Electronic Engineering, Hunan Business College, Changsha 410205)

【Abstract】 In this paper, a wireless sensor network node transmission power is variable, whose radius of maximum emission energy is k times of the smallest radius r , namely the kr wireless sensor network. The best suitable energy radius of ir is studied comprehensive. Through rigorous mathematical analysis, the energy consumption formula is given, and the compute method of optimal energy emission level k is gained. The optimization transmit power can greatly improve network life compared with transmit power, which plays the important instructing role for wireless sensor network.

【Key words】 wireless sensor network; mobile base station; network optimization; energy consumption balance; network life

1 概述

无线传感器网络的主要功能是对周边环境信息进行采集和管理, 并将感知到的数据发送到基站进行进一步处理^[1-3], 传感器节点上的资源非常有限。因此, 如何提高能源的使用效率从而延长网络生命周期成为主要的研究问题。一般来说, 在以 sink 为中心的网络中, sink 周围的负载是最重的, 为了平衡基站周围的负载, 研究人员提出了许多有效的方法, 其相关研究可参见文献[2-7]。

随着无线传感器技术的发展, 传感器节点的无线发射功率可控, 即节点可以根据接收者的距离来调整其发射功率, 如 Berkeley Motes 节点具有 100 个发射功率等级。这样, 节点能够根据应用的实际情况来调整发射功率, 降低网络的能量消耗, 延长网络寿命。

2 网络模型与问题描述

2.1 能量消耗模型

采用典型的能量消耗模型, 发送数据的能量消耗见式(1), 接收数据的能量消耗见式(2), 具体情况可参见文献[5]。

$$\begin{cases} E_{member} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 & \text{if } d < d_0 \\ E_{member} = lE_{elec} + l\epsilon_{amp}d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{rx}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

节点发送 1 bit 的数据消耗的能量如式(1)所示。其中, E_{elec} 表示发射电路损耗的能量。若传输距离小于阈值 d_0 , 则功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离大于等于阈值 d_0 时, 采用多路径衰减模型。 ϵ_{fs} , ϵ_{amp} 分别为这 2 种模型中功率放大所需的能量。节点接收 1 bit 的数据消耗的能量如式(2)所示。以上参数的具体设置取自文献[5], 如表 1 所示。

表 1 网络参数

参数	值
Threshold distance d_0/m	87
Sensing range r_s/m	15
$E_{elec}/(nJ \cdot bit^{-1})$	50
$\epsilon_{fs}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^{-2})$	10
$\epsilon_{amp}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^{-4})$	0.001 3
Initial energy/J	0.5

2.2 问题描述

在如图 1 所示的圆形传感器网络中, 网络节点的发射功率可变, 从 $\{1, 2, \dots, \Lambda\}$ 中选取, 最低的能量发射级别为 1, 其发射半径即发送距离为 r , 当发射级别为 k 时, 其发射半径为 kr 。

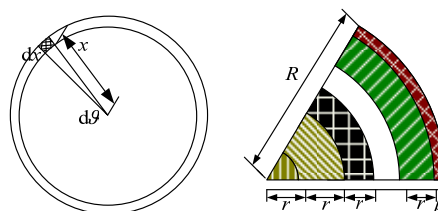


图 1 网络模型图

该模型的目标是: 如何安排节点的发射功率(从 $\{1, 2, \dots, \Lambda\}$ 中选取), 使得网络做到负载均衡、能量消耗最小, 从而

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060400886); 湖南省科技计划基金资助项目

作者简介: 王建明(1962-), 男, 副教授, 主研方向: 计算机网络, 信号处理, 无线传感器网络

收稿日期: 2009-01-13 **E-mail:** hnwjm6686@sina.com

达到网络寿命的最大化。

3 网络寿命最长的k值优化计算

笔者研究的无线传感器网络如图 1 所示，节点的最低能量级别的发射半径为 r 。能量的发射级别有 $\{1, 2, \dots, \Lambda\}$ 种级别，第 i 种级别的发射半径为 ir ，这些参数间的关系可用下式来表示：

$$\begin{cases} R = \alpha ir + b \mid b \leq ir \quad \alpha \in \{1, 2, \dots, \Lambda\} \\ \alpha = R/(ir) \quad // \text{取整} \end{cases} \quad (3)$$

网络寿命是网络中第 1 个死亡节点的时间，而要使得网络寿命最长，就是要使能量消耗最大节点的能量消耗最小化。首先，网络中每个节点在发射能量级别为 i 的情况下的数据转发量如定理 1 所示。

定理 1 距离 sink 节点距离为 $D=ikr+x$ 处的节点所承担转发数据的数据量为

$$\begin{cases} Data_r = 1 + \left\{ (a-1-i)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x) \\ // \text{if } D=ikr+x \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}, x \in \{b, b+1, \dots, kr\} \text{ 发送的数据} \\ Data_r = \left\{ (a-1-i)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x) \\ // \text{if } D=ikr+x \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}, x \in \{b, b+1, \dots, kr\} \text{ 接收的数据} \\ Data_i = 1 + \left\{ (a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x) \\ // \text{if } D=ikr+x \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}, x \in \{0, 1, \dots, b\} \text{ 发送的数据} \\ Data_r = \left\{ (a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x) \\ // \text{if } D=ikr+x \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}, x \in \{0, 1, \dots, b\} \text{ 接收的数据} \end{cases}$$

证明：

取网络中任意一个位置，它离圆心的距离为 $D=ikr+x$ 。然后，取宽度为 dx 的一小段圆环 ϕ ，如图 1 的阴影区域。那么此圆环的面积可以近似地计算为 $\phi_s = 2\pi x dx$ 。此环的节点数目为 $2\pi x dx \rho$ 。如果处于第 $\{ikr, ikr+1, \dots, ikr+b\} \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}$ 环内，即此位置为 $D=ikr+x \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}, x \in \{0, 1, \dots, b\}$ ，则 ϕ 负责转发所有离它为 kr 整数倍处宽度为 dx 圆环区域的数据转发，这些区域的面积可以计算为

$$2\pi((i+1)kr+x)dx + 2\pi((i+2)kr+x)dx + 2\pi((i+3)kr+x)dx + \dots + 2\pi(akr+x)dx = 2\pi dx \left((a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right)$$

这就是圆环 ϕ 接收数据区域的面积，则 ϕ 接收的数据为

$$2\pi dx \left((a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right) \rho \lambda$$

发送的数据为

$$\left\{ 2\pi dx \left((a-i)x + \left(\frac{(1+a)akr}{2} \right) \right) + 2\pi ikr+x \right\} dx \rho \lambda$$

在很小的区域内可以假设节点的数据是平均承担的，那么此区域的每个节点接收的数据量为

$$2\pi dx \left((a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right) \rho \lambda / 2\pi(ikr+x) dx \rho = \left\{ (a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x)$$

发送的数据为

$$1 + \left\{ (a-i)x + \left(\frac{(i+1+a)(a-i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x)$$

如果 $y=ikr+x \mid i \in \{0, 1, \dots, a\}, x \in \{b, b+1, \dots, kr\}$ 落在第 $\{ikr+b, ikr+kr\}$ 环内，则 ϕ 负责转发所有离它为 kr 整数倍处宽度为 dx 圆环区域的数据转发，这些区域的面积可以计算为

$$2\pi((i+1)kr+x)dx + 2\pi((i+2)kr+x)dx + 2\pi((i+3)kr+x)dx + \dots + 2\pi((a-1)kr+x)dx = 2\pi dx \left((a-i-1)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right)$$

那么 ϕ 接收的数据为

$$2\pi dx \left((a-i-1)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right) \rho \lambda$$

发送的数据为

$$\left\{ 2\pi dx \left((a-i-1)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right) + 2\pi x dx \right\} \rho \lambda$$

在相当小的区域内可以假设节点的数据是平均承担的。

那么此区域的每个节点接收的数据量为

$$\left\{ (a-1-i)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x)$$

发送的数据为

$$1 + \left\{ (a-1-i)x + \left(\frac{(a-i+1)(a+i)kr}{2} \right) \right\} \lambda / (ikr+x)$$

定理 2 网络中节点承担的数据量是一个随着距离增长而非递增的函数。

证明：从定理 1 中的每个节点承担的数据量可以得到，每个节点承担的数据量是一个非递增的函数，如图 2 所示。

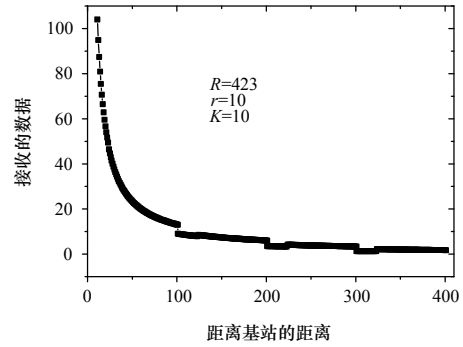


图 2 节点承担的数据量随距离 sink 节点越近而增长的曲线图

显然，知道每个节点承担的数据量，又知道除第 1 个 kr 环内的节点以实际发射距离来发送外，其他节点都是以 kr 的距离来发送的。可以得到下面的定义：

定义 距离 sink 节点距离为 $D=ikr+x$ 的节点能量消耗为

$$\begin{cases} E = Data_r \times E_{elec} + Data_i \times E_{elec} + Data_i \times \varepsilon_{fs} x^2 \\ \text{if } x < d_0 \text{ and } i = 0 \\ E = Data_r \times E_{elec} + Data_i \times E_{elec} + Data_i \times \varepsilon_{fs} x^4 \\ \text{if } x > d_0 \text{ and } i = 0 \\ E = Data_r \times E_{elec} + Data_i \times E_{elec} + Data_i \times \varepsilon_{fs} (kr)^2 \\ \text{if } kr < d_0 \text{ and } i \neq 0 \\ E = Data_r \times E_{elec} + Data_i \times E_{elec} + Data_i \times \varepsilon_{fs} (kr)^4 \\ \text{if } kr > d_0 \text{ and } i \neq 0 \end{cases}$$

定理 3 节点能量消耗最大的节点一定位于第 1 个 kr 内。且能量消耗最大的节点要么是离 sink 最近的节点，要么是离 sink 最远的节点。

证明：首先，第 1 个 kr 内的节点转发的数据量是最多的（见定理 2），因此，当节点的距离 sink 节点为 kr 时，它比所有距离 $> kr$ 的节点转发的数据都多，但发送的距离是相等的。所以位于 kr 的节点能量消耗一定比 $> kr$ 节点的能量消耗大，故能量消耗最大的节点一定位于第 1 个 kr 内。而对于第 1 个 kr 内的能量消耗计算公式为

$$\left\{ 2 \left(a + \left(\frac{(1+a)akr}{2x} \right) \right) + 1 \right\} \times E_{elec} + \left(1 + a + \left(\frac{(1+a)akr}{2x} \right) \right) \times \varepsilon_{fs} x^\theta$$

if $x > d_0$ then $\theta = 4$ else $\theta = 2$

上式为一个参数为正数的二次方程，其最大值位于参数的 2 个端点处。假设离 sink 最近距离为 r ，那么能量消耗最大的节点为

$$\begin{cases} E_{\max} = \max\{E_r, E_{kr}\} \\ E_r = 2(a + \frac{(1+a)a}{2}) + 1 \times E_{elec} \lambda + (1+a + \frac{(1+a)a}{2}) \times \varepsilon_{fs} (kr)^2 \lambda \\ \quad \text{if } kr > d_0 \text{ then } \theta = 4 \quad \text{else } \theta = 2 \\ E_{kr} = 2(a + \frac{(1+a)ak}{2}) + 1 \times E_{elec} \lambda + (1+a + \frac{(1+a)ak}{2}) \times \varepsilon_{fs} r^2 \lambda \\ \quad \text{if } r > d_0 \text{ then } r = 4 \quad \text{else } r = 2 \end{cases}$$

定理 4 必有一个 k 使得能量消耗最大节点的能量消耗最小, 即 $\min(E_{\max})$, 这时的网络寿命最长。

证明: k 的取值范围为 $\{1, 2, \dots, \frac{R}{r}\}$, 可以采用穷尽法依次选择 k , 使得 $\min(E_{\max})$ 最小的 k 就是网络的寿命最长的 k 。

图 3 表示了在不同 k 值下的能量消耗最大节点的能量消耗情况, 可见使得总能量消耗最小的 k 值就是使得网络寿命最大的能量发射级别。

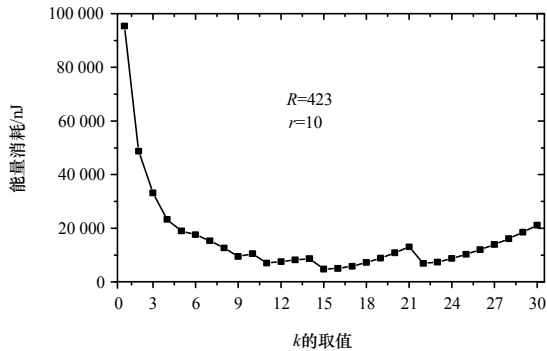


图 3 不同 k 值下能量消耗最大节点的能量消耗情况

4 数值计算分析

利用以上的研究结论进行数值分析。实验参数见表 1, 实验符号表示的意义与前面同。

图 4 显示的是在第 1 个 kr 内的能量消耗情况, 可见虽然在第 1 个 kr 内, 离 sink 近的节点发射距离最近, 但转发数据多, 能量消耗较高, 故形成如图 4 所示的图。

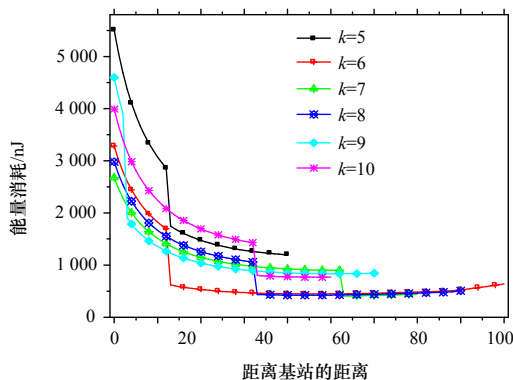


图 4 第 1 个 kr 内节点的能量消耗情况

如果 k 取较大的值时, 由于节点的能量发射超过 d_0 后是距离的 4 次方, 因此形成如图 5 所示的图。图 5 表示的是 r 取值不同情况下不同 k 值的能量消耗最大节点的能量消耗情况, 得到的结论是 r 值越小, 系统越容易得到最优的 k 值。

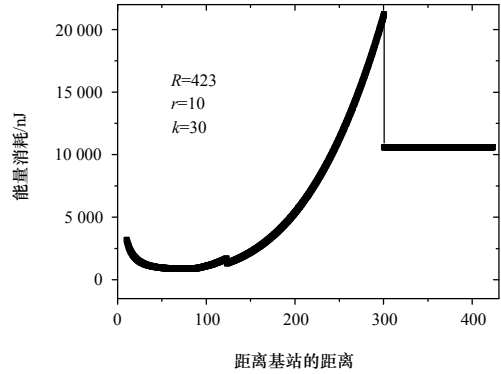


图 5 不同距离节点在不同 k 值下能量消耗情况

5 结束语

本文的主要工作是研究节点能量发射级别可变的网络参数优化问题。通过分析得到了较为详细的能量消耗计算公式, 给出了优化的参数设计方法与计算公式, 能够求得最优的能量发射级别 k 。对于指导实际的无线传感器优化具有较好的指导意义。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Li Jianzhong, Li Jinbao, Shi Shengfei. Concepts, Issues and Advance of Sensor Networks and Data Management of Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [3] Wang Wei, Srinivasan V, Chua K C. Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM Press, 2005: 270-283.
- [4] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks via Unequal Clustering[C]//Proc. of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks. Denver, Colorado, USA: [s. n.], 2005.
- [5] Mhatre V, Rosenberg C. Design Guidelines for Wireless Sensor Networks: Communication, Clustering and Aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45-63.
- [6] 李成法, 陈贵海, 叶 懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
- [7] 石高涛, 廖明宏. 传感器网络中具有负载均衡的移动协助数据收集模式[J]. 软件学报, 2007, 18(9): 2235-2244.

编辑 顾逸斐

(上接第 107 页)

参考文献

- [1] Ciancio A, Ortega A. A Distributed Wavelet Compression Algorithm for Wireless Sensor Networks Using Lifting[C]//Proc. of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal. Montreal, Canada: [s. n.], 2004.
- [2] 周四望, 林亚平, 张健明, 等. 传感器网络中基于环模型的小波数据压缩算法[J]. 软件学报, 2007, 18(3): 669-680.
- [3] 谢志军, 王 雷, 林亚平, 等. 传感器网络中基于数据压缩的汇
- [4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin 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 and Networking. Boston, MA, USA: [s. n.], 2000: 56-67.

编辑 顾逸斐

